



M 2014

ANÁLISE DO PROCESSO DE APLICAÇÃO DE VEDANTE NAS EMBALAGENS PARA AEROSSÓIS

JOÃO GONÇALO CAMEIRA NOGUEIRA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA

À FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO EM
ENGENHARIA INDUSTRIAL E GESTÃO

Análise do processo de aplicação de vedante nas embalagens para aerossóis

João Gonçalo Cameira Nogueira

Dissertação de Mestrado

Orientador na FEUP: Prof. Hermenegildo Pereira



FEUP

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Mestrado Integrado em Engenharia Industrial e Gestão

2014-07-25

À minha irmã, que tem sido uma grande inspiração

Resumo

No projeto que fundamenta esta dissertação estuda-se o processo de aplicação de vedante nos componentes de uma embalagem em folha-de-flandres para aerossóis. A função do vedante é garantir a hermeticidade da embalagem após a cravação dupla do fundo e cúpula ao corpo. Um problema crítico do processo alvo é a expulsão do vedante na cravação causado pelo excesso de humidade ou quantidade de borracha. Este defeito acarreta custos significativos de manuseamento, inspeção e retrabalho, aumentando o *lead time* do processo produtivo, constrangimentos que determinaram a análise dos fatores que influenciavam o processo e as causas dos problemas de qualidade recorrentes.

O diagnóstico do processo baseado nas variáveis representativas das duas características de qualidade críticas (quantidade de vedante aplicada e humidade residual do vedante) mostra que este produz uma grande quantidade de defeitos no que diz respeito às duas características. Constatou-se também que o sistema de medição usado em produção não tem resolução e reprodutibilidade adequadas à monitorização eficaz do processo.

Aplicando a análise causa-efeito constatou-se que existem quatro causas para a variação na quantidade de borracha aplicada: tempo inadequado de aplicação, pressão de injeção incorreta, alimentação obstruída e; variação na viscosidade. Realizaram-se várias experiências para estudar e validar estas causas.

Na secagem constata-se que o espaçamento entre componentes é o fator mais significativo na evaporação eficaz da água e que um arrefecimento forçado à saída no forno provoca reduções na humidade residual do vedante.

A avaliação do sistema de medição comprovou a instabilidade da balança na pesagem e a inadequação do suporte da amostra.

As soluções propostas para eliminação dos constrangimentos encontrados incluem a instalação de injetores de vedante eletrónicos de alta precisão, a restauração dos reguladores de pressão à sua condição básica, a instalação de reguladores de pressão de duas etapas, a criação de um sistema de controlo de viscosidade contínuo, a alteração dos fornos para conseguir espaçamento entre componentes e a adoção de cartas de controlo para garantir a qualidade do *output* do processo.

Na análise constatou-se a instabilidade do processo que justificava a implementação de várias melhorias. Sendo a inspeção final impossível, é imperativo usar cartas de controlo para monitorizar o processo garantindo a estabilidade e qualidade no produto. Numa primeira fase, o seu uso servirá para a identificação de mais causas de variação que não tenham sido encontradas durante o projeto.

Analysis of the compound lining process on aerosol packages

Abstract

A study of the compound lining process on the ends of a tinplate aerosol package is carried out in this dissertation. The purpose of the compound is to help to achieve the hermeticity of the package during the double seaming process. A critical problem in this factory is the expulsion of the compound from the seam caused by its excessive moisture or excessive quantity. This defect implies handling, inspection and rework costs and increases the lead time of the production process. This project investigates the influencing factors of the process and the causes of the recurring quality problems.

The process diagnosis based on the two variables representative of key quality characteristics (compound weight and residual moisture) shows that a large quantity of defects is produced. One also verifies a lack of adequate precision of the measurement system.

Through a cause-effect analysis, the four main causes for the variation in compound weight are determined to be: incorrect lining time, incorrect lining pressure, obstructed compound feeding line and compound viscosity variation. Various experiments are presented that study and validate these causes.

Regarding the drying process, one comes to the conclusion that the spacing between ends is the most significant factor in effective water evaporation. One also verifies that a forced cooling at the oven's exit reduces the residual moisture of the compound.

The evaluation of the measurement system proves the scale's instability and the lack of support for the sample being weighed.

The proposed solutions to the encountered problems include the installation of high precision electronic compound lining guns, the restoration of the pressure regulators to its basic condition, the installation of double stage pressure regulators, the creation of a continuous control system for the compound viscosity, the upgrading of existing ovens to assure proper spacing between ends and the adoption of control charts as a means to guarantee process output quality.

This analysis showed that the process is highly unstable and various improvements are needed. Since final inspection is impossible in this process, the use of control charts to monitor the quality produced is imperative. In the start of its implementation they will serve as a means of identifying more causes of variation that were not detected during this project.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, quero agradecer a todos os colaboradores da Estampagem de Aerossóis da fábrica de Vale de Cambra da Colep por toda a sua disponibilidade e vontade de partilhar o seu conhecimento. Um agradecimento especial ao Armando Costa, pelos vastos conhecimentos que me transmitiu e à Paula Cardoso pela forma extraordinária como me recebeu e pela sua ajuda em todas as experiências realizadas.

Agradeço também ao meu orientador na Colep, o Eng.º Jorge Rodrigues, pela sua total disponibilidade para responder às minhas questões e pela forma como deu a conhecer o meu trabalho dentro da empresa. Fico agradecido ao Eng.º Carlos Rodrigues e a Eng.ª Paula Martins por terem desencadeado projetos de melhoria baseados no meu trabalho. Agradeço ainda à Fátima Soares, à Eng.ª Ana Ferreira, ao Eng.º António Scarfone, à Eng.ª Rita Casal, ao Sr. Manuel Sousa, ao Eng.º Eduardo Monteiro, ao Eng.º Renato Valente, ao Eng.º Alexandre Sá e à Cristina Oliveira. Um agradecimento ao meu colega Emanuel Brito pela boa companhia no gabinete e pela troca de ideias que proporcionou.

Ao Eng.º Hermenegildo Pereira, orientador na FEUP, fica também aqui o meu agradecimento pela prontidão das suas respostas e pela sua ajuda na elaboração da presente dissertação.

Sendo este projeto o culminar de vários anos de estudo, quero também agradecer aos meus dois amigos que me acompanharam durante esta jornada: Daniel Madureira e José Olegário Ferreira. Agradeço também à minha família e à minha namorada Lúcia Ribeiro por todo o apoio prestado durante este período da minha vida.

Resta-me agradecer à Colep pela bolsa de estágio que me concedeu e pela forma como fui recebido nas instalações da empresa.

Índice de conteúdos

1	Introdução	1
1.1	Apresentação da empresa	1
1.2	O projeto de análise de aplicação de vedante na Colep	2
1.3	Método seguido no projeto	2
1.4	Estrutura da dissertação	2
2	Enquadramento teórico	4
2.1	Controlo estatístico de processos	4
2.2	Ferramentas de melhoria dos processos	10
2.3	Análise de sistemas de medição	14
2.4	Planeamento de experiências	17
3	Definição do problema	22
3.1	Processo de fabrico de uma embalagem para aerossol	22
3.2	Processo de aplicação de vedante	23
3.3	Defeitos relacionados com o vedante	25
3.4	Controlo do processo	26
4	Diagnóstico do processo	28
4.1	Aplicação de vedante	28
4.2	Secagem	29
4.3	Sistema de medição	31
5	Análise do processo	33
5.1	Aplicação de vedante	33
5.2	Secagem	37
5.3	Sistema de medição	43
6	Soluções propostas	45
6.1	Aplicação de vedante	45
6.2	Secagem	45
6.3	Sistema de medição	46
6.4	Controlo do processo	47
7	Conclusão	48
7.1	Trabalhos futuros	48
	Referências	50
A	Plano da experiência de exploração do processo de secagem	52
B	Desenho do regulador de pressão	57

Siglas

ANOVA análise de variância

CCD central composite design

CUSUM cumulative sum

EN especificação nominal

EWMA exponentially-weighted moving average

LC linha central

LCI limite de controlo inferior

LCS limite de controlo superior

LEI limite de especificação inferior

LES limite de especificação superior

RSM response surface methodology

Índice de figuras

1.1	Áreas de negócio da Colep.	1
2.1	Modelo de um processo segundo Montgomery (2009, 13).	4
2.2	Exemplo de uma carta de controlo \bar{X} e R	10
2.3	O ciclo PDCA na melhoria contínua de um processo.	11
2.4	Efeito da interação entre dois fatores na variável de resposta de um processo.	18
2.5	Gráficos de contorno de modelos obtidos a partir de desenhos experimentais do tipo RSM.	20
2.6	<i>Central composite design</i> para um modelo de segunda ordem de dois fatores.	21
3.1	As três peças de uma embalagem para aerossol.	22
3.2	Esquema de uma cravação dupla entre corpo e fundo. Fonte: http://www.doubleseam.com/a-finished-double-seam/a-finished-double-seam	22
3.3	Fluxograma geral do processo produtivo.	23
3.4	Esquema do injetor de borracha.	23
3.5	Esquemas dos dois tipos de fornos existentes.	23
3.6	Sistema de aplicação de vedante.	24
3.7	Esquema de uma linha de fundos com duas pistas.	24
3.8	Defeitos relacionados com o vedante detetáveis por inspeção visual.	25
3.9	Defeitos de borracha fora da cravação.	26
4.1	Histograma do desvio percentual em relação ao nominal de peso húmido.	28
4.2	Histograma da humidade residual.	29
4.3	Comparação do espaçamento na linha entre componentes.	30
4.4	Etiquetas termossensíveis colocadas no interior de um fundo.	30
5.1	Diagrama de causa-efeito para o defeito peso húmido não conforme.	33
5.2	Variação do peso húmido devido à variação da pressão da rede.	35
5.3	Resultados da experiência para testar efeito da pressão de entrada no regulador.	36
5.4	Diagrama de dispersão da temperatura da amostra de borracha e sua viscosidade.	37
5.5	Diagrama de dispersão do peso húmido e da humidade residual.	37
5.6	Efeitos principais dos fatores na humidade residual.	38
5.7	Interação entre a temperatura e o espaçamento.	39
5.8	Configuração da primeira experiência <i>RSM</i> para otimização da temperatura e espaçamento.	40
5.9	Gráfico de contornos do modelo resultado da experiência de otimização de temperatura e espaçamento.	41
5.10	Configuração da segunda experiência <i>RSM</i> para otimização da temperatura e espaçamento.	41
5.11	Fundos espaçados junto dos arrefecedores à saída do forno.	42
5.12	Efeito do tempo de arrefecimento na humidade residual da borracha.	42
5.13	Efeito de fatores ambientais na humidade residual da borracha.	43
5.14	Erro na medição e sua solução.	43
5.15	Proteção da balança contra as movimentações de ar desestabilizadoras.	44
6.1	Flutuador magnético para amortecimento da queda das cúpulas.	46

Índice de tabelas

2.1	Defeitos por milhão para diferentes níveis sigma.	6
2.2	As quatro experiências num desenho experimental 2^2	19
4.1	Temperatura e tempo de permanência nos fornos de fundos e de cúpulas.	30
4.2	Resultados do estudo de diagnóstico do sistema de medição.	32
5.1	Variação do processo de aplicação nas várias linhas. As letras <i>D</i> e <i>E</i> indicam o lado direito ou esquerdo da linha.	34
5.2	Resultados das experiências—tabela ANOVA.	38
5.3	Resultados da experiência de otimização de temperatura e espaçamento.	40
A.1	Variáveis de controlo da experiência.	53
A.2	Fatores a manter constantes.	54
A.3	Fatores ruído.	54
A.4	Conjunto de experiências realizadas.	56

1 Introdução

1.1 Apresentação da empresa

A Colep é uma empresa de origem portuguesa, detida pelo Grupo RAR, cuja história recente começa pela fusão com a CCL Custom Manufacturing Europe em 2004, criando assim a maior empresa europeia em *contract manufacturing* de produtos de beleza, farmacêuticos e domésticos (Colep 2014). As áreas de negócios em que a Colep está presente estão esquematizadas na Figura 1.1.

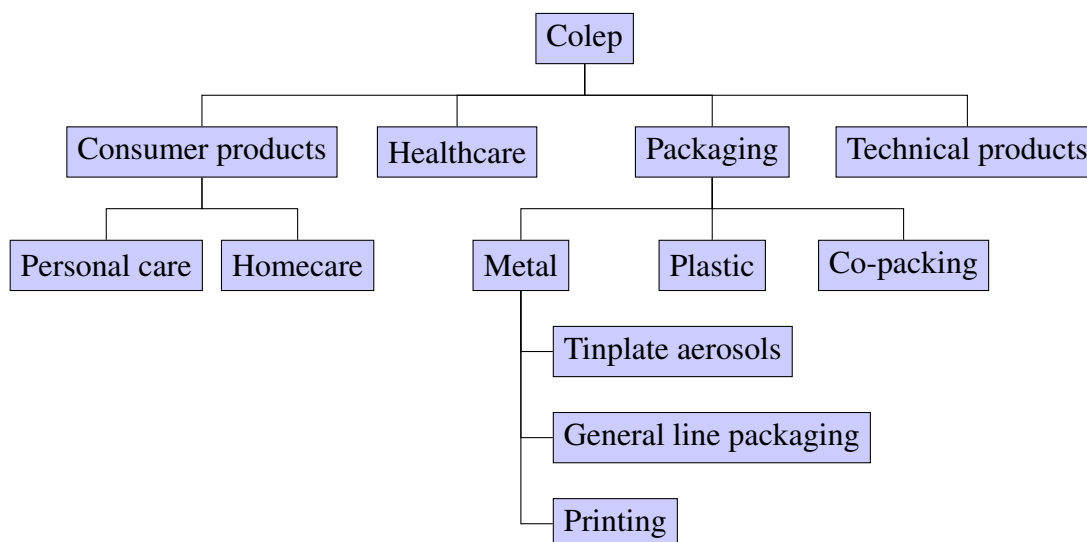


Figura 1.1: Áreas de negócio da Colep.

É ainda capaz de satisfazer as necessidades dos seus clientes no que toca à formulação de produto, desenvolvimento de conceito, serviços de *design* e construção de protótipos.

A empresa atingiu em 2013 um volume de negócios acima dos 500 milhões de euros, um resultado operacional de 16,5 milhões de euros e um resultado líquido de 3 milhões (Colep 2014). A sua presença é já global, tendo instalações na Europa, América e ainda na Ásia através de uma aliança estratégica com a One Asia Network (Colep 2013).

As instalações de Vale de Cambra, onde este projeto decorreu, alberga a única fábrica de litografia da empresa, a maior fábrica de *metal packaging*, uma fábrica de enchimento e ainda as instalações de *plastic packaging* e de *co-packing*. A fábrica de *metal packaging* contém a divisão de aerossóis, dividida em estampagem e montagem.

A secção de Estampagem de Aerossóis, onde o projeto decorreu, é responsável pela produção dos componentes das embalagens para aerossóis tanto para as linhas de montagem em Vale de Cambra como para a fábrica na Polónia que dispõe de duas linhas de montagem de aerossóis. Esta secção é composta por seis linhas de fundos e sete linhas de cúpulas, tendo capacidade para mais de 2 milhões de componentes por dia.

1.2 O projeto de análise de aplicação de vedante na Colep

O problema que deu origem a este projeto foi a recorrência de um defeito relacionado com o vedante. Este problema sempre existiu mas não se verifica quando o produto é armazenado durante tempo suficiente entre processos. A diminuição dos *stocks* de *work in progress* e o desejo de criar um processo produtivo com maior fluidez diminuiu este tempo de estágio entre processos e levou a um agravamento do problema.

Numa altura em que se exige cada vez mais capacidade de resposta das cadeias de abastecimento, os *lead times* de produção tornam-se extremamente importantes, pois são eles que definem a rapidez com que se pode satisfazer um cliente. Problemas de qualidade levam a um aumento significativo do *lead time*, pois requerem operações de manuseamento, inspeção e retrabalho que seriam evitados se o defeito não ocorresse.

Estando a Colep comprometida em atingir níveis de serviço excelentes, a imprevisibilidade dos *lead times* introduzida por este tipo de problemas de qualidade torna-se uma fraqueza da empresa. Para que os prazos de entrega sejam cumpridos, é essencial que os processos de produção sejam estáveis e capazes de produzir com consistente qualidade.

Este projeto pretende então analisar o processo de aplicação de vedante que, por não ter sido crítico até então, é pouco conhecido e estudado. Pretende-se averiguar as causas do defeito recorrente, procurando encontrar as causas raiz dos problemas por via de uma análise sólida e robusta.

1.3 Método seguido no projeto

O desenvolvimento do projeto assentou muito na recolha do conhecimento dos técnicos e operadores do processo. Esta foi efetuada com extensa observação *in loco*, que contribuiu para a escolha das questões a colocar aos peritos do processo.

A averiguação de causas passou essencialmente pelo uso de cartas de controlo como instrumento de exploração do processo juntamente com análises causa-efeito, elaboradas em conjunto com os peritos. Procurou-se comprovar estatisticamente as causas encontradas durante esta análise.

À medida que os problemas foram encontrados e analisados, desencadearam-se vários projetos de melhoria que não foram completados durante este projeto. Para além disso, foram deixadas várias recomendações à empresa, especialmente relativas à construção de um controlo de processo robusto e eficaz.

1.4 Estrutura da dissertação

Esta dissertação é composta pela presente introdução onde se contextualiza o problema, a sua origem e se descreve o método pelo qual o projeto se pautou.

Segue-se um enquadramento teórico do trabalho desenvolvido no projeto, apresentando as técnicas usadas, nomeadamente controlo estatístico de processos, ferramentas de melhoria de processos, análise de sistemas de medição e planeamento de experiências.

O capítulo que se segue apresenta o estado atual do processo e do seu sistema de medição. Apresentam-se as distribuições das variáveis de resposta relevantes e ainda os resultados de um estudo de diagnóstico do sistema de medição. No capítulo seguinte, exploram-se várias causas

para os problemas referidos no diagnóstico. Este estudo do processo consiste essencialmente na análise e comprovação estatísticas das hipóteses colocadas aquando das análises causa-efeito efetuadas junto com operadores e técnicos.

Propostas para solucionar os problemas encontrados são então apresentadas. Algumas delas desencadearam projetos de melhoria, enquanto outras são apenas recomendações para trabalhos futuros sobre a aplicação de vedante.

Na conclusão é feita uma reflexão sobre os resultados do projeto e a direção em que poderão ser feitos mais estudos. Reitera-se, mais uma vez, a importância de um controlo de processo robusto e eficaz.

2 Enquadramento teórico

2.1 Controlo estatístico de processos

Segundo Antony e Taner (2003), o controlo estatístico de processos é parte integrante da monitorização, gestão, manutenção e melhoria de um processo através do uso eficaz de métodos estatísticos. Oakland (2008, 16) argumenta que este não deve ser entendido apenas como um conjunto de ferramentas, mas como uma estratégia. Essa estratégia passa pela melhoria contínua do processo, muitas vezes através da redução da sua variação. De facto, as ferramentas estatísticas apenas informam sobre a inadequação do processo, cabendo aos responsáveis pelo processo encontrar a causa raiz do problema e eliminá-la, contribuindo assim para a melhoria contínua (Antony e Taner 2003).

O controlo estatístico de processos encontra aplicação nas mais variadas organizações. É normalmente usado para garantir características de qualidade de um produto evitando a inspeção de todas as unidades produzidas. No entanto, as mesmas técnicas podem ser adaptadas para uso em serviços (Mason e Antony 2000).

2.1.1 Modelo de um processo

Oakland (2008, 5) define um modelo muito geral do processo que considera que este é apenas uma transformação de um conjunto de entradas num conjunto de saídas. Num contexto de controlo estatístico de processos, um modelo mais detalhado como o proposto por Montgomery (2009, 13), apresentado na Figura 2.1 é mais útil.

Este modelo separa as entradas do processo em *input*, fatores controláveis e fatores não controláveis. Além disso, de todas as saídas do processo, só tem em conta as características de qualidade do produto. Os fatores controláveis são, por exemplo, num processo de reação química, o tempo e temperatura da reação. Fatores incontroláveis são, tomando o mesmo exemplo, a temperatura ambiente ou a humidade relativa do ar. Note-se que os *inputs* do processo podem ou não ser controláveis. No caso de o *input* ser produzido internamente à organização, este pode ser considerado controlável. Por outro lado, se o *input* é produzido por um fornecedor externo, este pode já não ser controlável. No entanto, a longo prazo e através do estabelecimento de relações mais próximas com o fornecedor, esse *input* pode ser controlável. Tudo depende do âmbito em que o processo está a ser considerado.

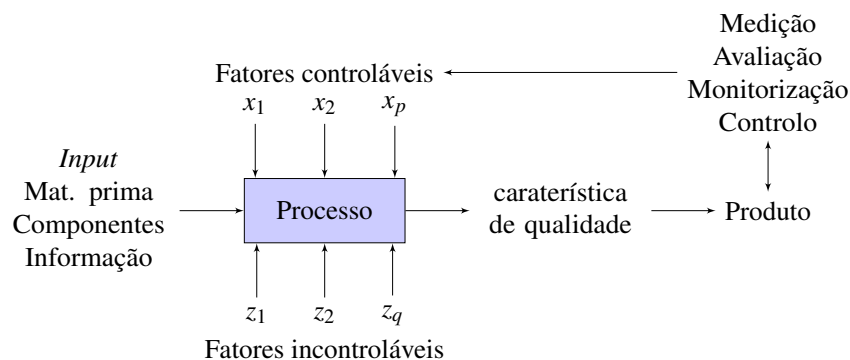


Figura 2.1: Modelo de um processo segundo Montgomery (2009, 13).

Este modelo é útil, pois torna claro que um processo pode ser controlado através dos seus fatores controláveis, tendo ainda que ser robusto às variações nos fatores incontroláveis.

2.1.2 *Variação nos processos*

Um fator crítico para a valorização da importância do controlo estatístico de processos é a compreensão da variação num processo. Esta variação existe em todos os processos e deve ser compreendida e confrontada para que seja gerida (Oakland 2008, 21).

Causas de variação comuns e especiais

As causas de variação devem ser classificadas como comuns ou especiais. As causas comuns são aquelas que resultam da interação complexa entre vários fatores de caráter aleatório. Estas causas geram uma distribuição aleatória na variável de resposta do processo e não podem ser diminuídas a não ser pelo estudo profundo do processo e respetivas alterações. As causas de variação especiais, por outro lado, originam variações de grande magnitude na variável de resposta e podem ser identificadas e eliminadas mais prontamente (Oakland 2008, 68–69).

Se estas duas categorias de variação não forem distinguidas, corre-se o risco de tomar decisões baseadas em observações que resultam da variação normal do processo e não de alguma causa identificável. Este tipo de decisões são chamadas de *tampering* e acabam por resultar numa amplificação da variação do processo, como é mostrado por Deming (2000, cap. 9) com a sua experiência do funil. Oakland (2008, cap. 4) descreve o mesmo problema, dando um exemplo em que muita energia é gasta a encontrar causas específicas para uma variação comum do processo. Uma outra consequência da falta de compreensão da variação de um processo é que as causas especiais poderão ser absorvidas pelo excessivo *tampering* do processo, resultando que a causa raiz de um problema possa nunca ser identificada.

Estabilidade do processo

Quando um processo apresenta apenas causas de variação comuns a distribuição estatística da característica de qualidade será constante, permitindo prever o comportamento do processo. Um processo neste estado diz-se estável ou em controlo estatístico (Pyzdek e Keller 2003, 403).

A distribuição estatística mais frequentemente observada em processos estáveis é a distribuição Normal. O teorema do limite central afirma que se forem retiradas amostras de tamanho n de uma população de valor esperado μ e desvio-padrão σ , então à medida que n aumenta, a distribuição das médias das amostras aproxima-se a uma Normal de valor esperado μ e desvio-padrão σ/\sqrt{n} (Oakland 2008, 94). Um corolário do teorema do limite central é que se uma característica de qualidade é afetada por um grande número de efeitos muito pequenos e estes têm igual probabilidade de assumir valores mais baixos ou mais altos que a sua média então essa característica de qualidade seguirá uma distribuição Normal (Montgomery 2009, 118).

A estabilidade de um processo é extremamente importante pois é possível prever com precisão o *output* do processo, permitindo assim uma eficaz monitorização do processo e uma estabilização dos processos a montante e a jusante. De facto, Wilson (2009, 26–28) afirma que a estabilidade de um processo é a fundação sobre a qual se pode construir um sistema de produção *lean*. Esta é

também um requisito para a melhoria contínua do mesmo através da redução da sua variação em abordagens do tipo *Six Sigma* (Goh 2002, 663).

2.1.3 Capacidade do processo

Assim que um processo se encontra estável, e portanto previsível, é possível estudar o quão capaz ele é de cumprir os requisitos do cliente. O indicador usado para tal é a *capacidade do processo*. Este compara a localização e dispersão da variável de resposta de um processo com as especificações do cliente, obtendo assim uma medida da capacidade do processo para satisfazer as necessidades deste (Oakland 2008, 257).

Considere-se a variável de resposta Y de um processo. Se esta variável puder ser modelada por uma distribuição normal, então ela pode ser definida por um valor esperado μ e um desvio-padrão σ . Considere-se também que existe um valor nominal EN, um limite de especificação inferior LEI e um limite de especificação superior LES.

Admitindo que a localização da variável de resposta é perfeita, ou seja, $\mu = EN$, a capacidade do processo vai depender apenas da sua variação, medida por σ . Uma forma de obter um valor para a capacidade do processo neste caso é comparar o desvio-padrão com a amplitude da especificação, como mostra a equação 2.1. Este indicador é denominado *nível sigma* e mostra quantos desvios-padrão existem entre o valor esperado do processo e um dos limites de especificação, assumindo que a tolerância é simétrica e que o valor esperado do processo é igual à especificação nominal.

$$\text{Nível sigma} = \frac{\frac{LES-LEI}{2}}{\sigma} \quad (2.1)$$

Quanto maior for o *nível sigma*, menor será a percentagem de ocorrências fora dos limites de especificação. Esta percentagem é normalmente expressa a partir do indicador *defeitos por milhão*. A Tabela 2.1 mostra os defeitos por milhão esperados num processo com diferentes níveis sigma, assumindo que a variável de resposta tem uma distribuição normal e o seu valor esperado é igual à especificação nominal.

Tabela 2.1: Defeitos por milhão para diferentes níveis sigma.

Nível sigma	Defeitos por milhão
1σ	317311
2σ	45500
3σ	2700
4σ	63
5σ	1
6σ	0.002

Uma vez que o requisito mínimo para o nível sigma é 3 (Oakland 2008, 259), uma forma muito intuitiva de avaliar a capacidade de um processo é compará-lo com este requisito mínimo. Assim,

o índice de capacidade do processo C_p , calculado segundo a equação 2.2, será igual a 1 quando o processo cumpre o requisito mínimo e menor do que 1 quando o processo não o cumpre.

$$C_p = \frac{LES - LEI}{6\sigma} \quad (2.2)$$

No entanto, o índice C_p não é o melhor indicador da capacidade do processo, uma vez que assume que $\mu = EN$. O índice C_{pk} é mais apropriado, pois tem em conta o limite de especificação mais próximo do valor esperado do processo. Este índice pode ser calculado a partir da equação 2.3. O índice C_p é apropriado quando a média do processo é facilmente ajustável e esta é monitorizada para que os ajustes necessários possam ser efetuados (George et al. 2005, 138).

$$C_{pk} = \min \left[\frac{LES - \mu}{6\sigma}, \frac{\mu - LEI}{6\sigma} \right] \quad (2.3)$$

2.1.4 Cartas de controlo

As cartas de controlo são uma ferramenta estatística desenhada para identificar facilmente os dois tipos de variação descritos na secção anterior. Uma carta de controlo pode ser entendida como um simples teste de hipóteses em que a hipótese nula é “o processo está em controlo estatístico” (ou seja, toda a variação tem causas comuns) e a hipótese alternativa representa o aparecimento de uma causa especial de variação (Montgomery e Runger 2010, 642).

Um modelo básico de uma carta de controlo para uma variável de resposta X consiste numa linha central igual à média μ_X de X e as linhas de controlo inferior e superior que distam da linha central um número k de desvios-padrão σ_X (normalmente $k = 3$), como descrito no conjunto de equações 2.4 (Montgomery e Runger 2010, 642).

$$\begin{aligned} LCS &= \mu_X + k\sigma_X \\ LC &= \mu_X \\ LCI &= \mu_X - k\sigma_X \end{aligned} \quad (2.4)$$

Estas linhas são desenhadas num gráfico da série temporal constituída pelas observações da variável de resposta. Se a observação ultrapassar as linhas de controlo, deve-se assumir que existe uma causa especial de variação e iniciar o processo de identificação e eliminação dessa causa.

Das técnicas usadas no controlo estatístico de processos, as cartas de controlo são das mais conhecidas e mais populares. Montgomery e Runger (2010, 643) apresentam cinco razões para este facto:

São uma técnica comprovada de aumento da produtividade Uma implementação correta irá reduzir a quantidade de sucata e retrabalho.

São eficazes na prevenção de defeitos A carta de controlo ajuda a manter o processo em controlo, evitando o aparecimento de defeitos.

Previnem ajustes desnecessários do processo Ao distinguirem entre causas comuns e causas especiais, as cartas de controlo previnem o *tampering* do processo.

Fornecem informação de diagnóstico As cartas de controlo fornecem bastante informação sobre o comportamento do processo ao longo do tempo. Esta informação pode ser usada para implementar melhorias no processo.

Fornecem informação sobre a capacidade do processo As observações numa carta de controlo são uma excelente representação da capacidade do processo a longo prazo.

A carta de média e amplitude

Para a monitorização de variáveis contínuas, a carta de controlo mais simples de construir é chamada \bar{X} e R . \bar{X} representa a média das amostras e R representa a amplitude (R vem de *range*, amplitude em inglês). Esta carta utiliza uma amostra de n unidades denominada *subgrupo* retirada com uma certa frequência. A média e amplitude do subgrupo são as variáveis usadas para controlar o processo.

Seguindo o modelo básico apresentado pela equação 2.4, pode-se admitir como estimador do valor esperado a média das médias dos subgrupos, resultando a equação 2.5, onde N é o número de subgrupos.

$$LC = \hat{\mu}_X = \bar{\bar{X}} = \frac{\sum_{i=1}^N \bar{X}_i}{N} \quad (2.5)$$

Para calcular os limites de controlo, é necessário estimar σ . É possível obter um estimador do desvio-padrão a partir da amplitude usando a constante de Hartley d_n (Oakland 2008, 112). Assim, a equação 2.6 mostra como obter este estimador.

$$\hat{\sigma}_X = \frac{\bar{R}}{d_n} = \frac{\frac{\sum_{i=1}^N R_i}{N}}{d_n} \quad (2.6)$$

A variável \bar{X} , sendo a média da variável de resposta em estudo, seguirá uma distribuição $N(\mu_X, \sigma_X/\sqrt{n})$ de acordo com o teorema do limite central (Montgomery e Runger 2010, 227). Assim, os limites de controlo para a carta das médias podem ser calculados a partir da equação 2.7.

$$LCI \text{ ou } LCS = \bar{\bar{X}} \pm \frac{k}{d_n\sqrt{n}} \bar{R} \quad (2.7)$$

Os limites para a carta das médias só serão válidos se a dispersão da distribuição da variável de resposta X se mantiver constante. Para assegurar este pressuposto, é necessário calcular linhas de controlo para a amplitude dos subgrupos. O princípio usado é o mesmo mas a derivação é mais complexa porque a distribuição da amplitude é assimétrica (Oakland 2008, 115). Assim, o cálculo dos limites é executado usando constantes tabeladas e as equações 2.8 e 2.9 (Montgomery e Runger 2010, 651).

$$LCS = D_3 \bar{R} \quad (2.8)$$

$$LCI = D_4 \bar{R} \quad (2.9)$$

Esta carta é a mais simples no controlo de variáveis contínuas. Apesar de cartas mais avançadas como as cartas *EWMA* ou *CUSUM*¹ serem capazes de detetar mudanças mais pequenas no processo, a carta \bar{X} e R é muito usada porque a sua construção é simples e pode ser elaborada pelo próprio operador do processo numa folha de papel gráfico.

Interpretação de cartas de controlo

A Figura 2.2 mostra um exemplo de uma carta de controlo \bar{X} e R . A observação 7 na Figura 2.2a ultrapassa a linha de controlo superior. Isto significa que há muito pouca probabilidade de uma medição destas acontecer sem que tenha havido uma mudança no processo. Ou seja, existe uma causa especial de variação. As observações fora das linhas de controlo são a regra mais simples para detetar causas especiais. No entanto, existem outros padrões que indicam mudanças no processo. Na verdade, se as causas de variação são apenas comuns não deve ser possível detetar qualquer tipo de padrão nas observações uma vez que estas serão perfeitamente aleatórias (Oakland 2008, 125). Assim, não pode haver tendências, sequências repetidas, sequências de pontos de um dos lados da linha central e qualquer outro tipo de padrão².

¹ As cartas *EWMA* (Exponentially Weighted Moving Average) e *CUSUM* (Cumulative Sum) usam informação das observações anteriores para aumentarem a sua sensibilidade a mudanças no processo. Consultar Montgomery (2009, cap. 9) para mais informações.

² Para uma lista dos padrões mais comuns, consultar George et al. 2005, 133.

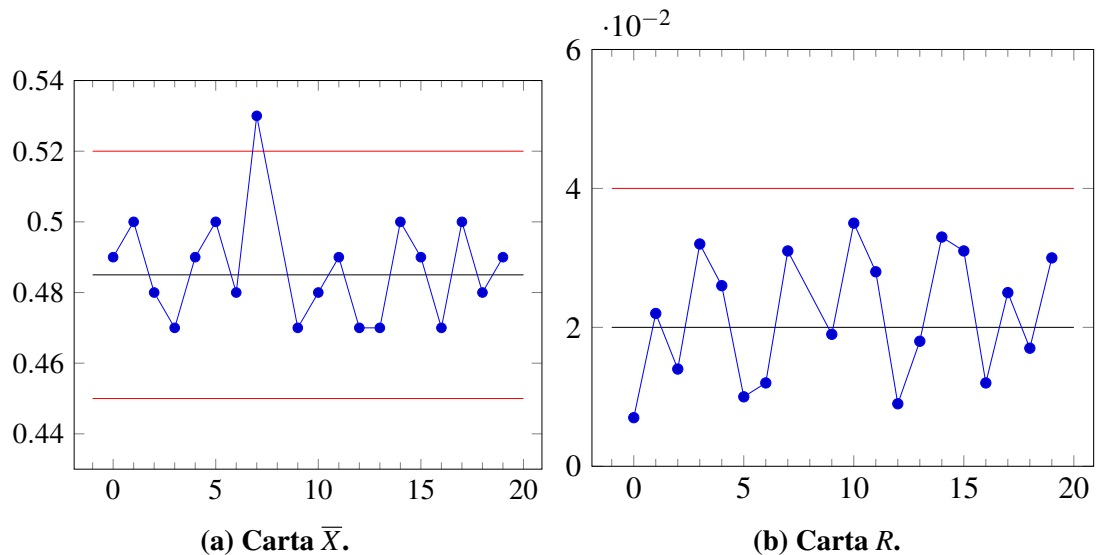


Figura 2.2: Exemplo de uma carta de controlo \bar{X} e R .

Fases de implementação de cartas de controlo

Existem duas fases bastantes distintas na implementação de cartas de controlo. A primeira passa por analisar o processo alvo, assumindo que está fora de controlo estatístico, usando dados recolhidos para esse efeito ou dados históricos. A partir destes dados é possível concluir quanto à estabilidade do processo calculando limites de controlo provisórios. Nesta fase, é típico detetar uma grande variedade de causas especiais de variação, e tem de haver um esforço para que estas sejam eliminadas. De cada vez que uma causa especial de variação é eliminada, a observação que a detetou é eliminada e novos limites de controlo são calculados. O processo é continuamente monitorizado através de cartas de controlo durante esta fase e assim que o processo se mantém em controlo estatístico durante um período relativamente longo, assume-se que o processo é estável e passa-se à segunda fase (Montgomery 2009, 198–199).

Na segunda fase o objetivo é a simples monitorização do processo. Nesta fase, as causas especiais de variação serão tipicamente mais pequenas. Se o processo for crítico, fará sentido utilizar cartas de controlo mais sensíveis como a carta *EWMA* ou a carta *CUSUM* (Montgomery 2009, 198–199). Se o processo não for crítico, as cartas mais básicas usadas para a primeira fase poderão continuar a ser usadas. Ao fim de um período de tempo relativamente longo, pode-se até considerar abandonar o uso da carta de controlo, assumindo que todas as causas especiais de variação importantes foram identificadas e eliminadas (Wilson 2009, 215–217).

2.2 Ferramentas de melhoria dos processos

2.2.1 O ciclo PDCA

O ciclo PDCA (*Plan–Do–Check–Act*) é uma metodologia usada na melhoria de processos. São propostas quatro fases distintas (Montgomery 2009, 21; Pyzdek e Keller 2003, 378):

Plan planejar uma mudança ou experiência no sistema com objetivo de melhoria;

Do implementar a mudança ou conduzir a experiência, preferencialmente em pequena escala;

Check analisar os resultados e retirar conclusões;

Act promover a mudança sustentada ou procurar outra solução de melhoria.

Oakland (2008, 346) propõe uma diferente interpretação da metodologia. Na sua perspectiva, a fase *Plan* deve abordar o processo a um nível mais alto e centrar-se em definir o problema e garantir que os esforços de melhoria terão um impacto positivo nos objetivos. A segunda fase deve definir os processos a melhorar e identificar oportunidades de melhoria. A fase *Check* pretende recolher dados que permitam testar as hipóteses levantadas nas fases anteriores. Na última fase deve-se analisar os resultados obtidos e determinar as ações necessárias.

A abordagem aos problemas nesta metodologia é de natureza iterativa. O ciclo PDCA deve ser usado como uma ferramenta de melhoria contínua cimentando os ganhos com cada iteração. Uma analogia muito usada é aquela representada na Figura 2.3. A contínua aplicação das 4 fases leva o processo a níveis mais altos de performance. A cunha na figura representa a necessidade de usar instrumentos que garantam a manutenção dos ganhos conseguidos (Sokovic, Pavletic e Pipan 2010).

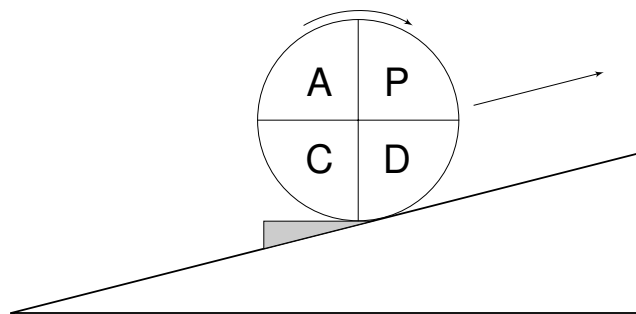


Figura 2.3: O ciclo PDCA na melhoria contínua de um processo.

Wilson (2009, 103) argumenta que esta ferramenta é mais eficaz quando é possível avançar rapidamente pelas quatro fases e completar várias iterações num curto espaço de tempo. Sendo o ciclo de natureza iterativa, é razoável assumir que será gerado mais conhecimento quando as iterações são rápidas. No entanto, para que isso aconteça, é necessário que os processos sejam transparentes. Isto é, os problemas são visíveis, a recolha de dados é rápida e a condução de experiências é facilitada.

Tendo isto em conta, pode-se argumentar que a interpretação proposta por Montgomery (2009) e Pyzdek e Keller (2003, 378) é mais eficaz porque a sua simplicidade resulta em mais iterações. No entanto, a interpretação de Oakland (2008, 346) terá as suas vantagens, especialmente em projetos de maior envergadura em que uma clara definição do problema e uma análise mais cuidadosa são vantagens.

2.2.2 As 7 ferramentas básicas da qualidade

Ishikawa (1985, 198) apresenta um conjunto de sete ferramentas que, na sua opinião, são capazes de resolver cerca de 95 % dos problemas de qualidade numa empresa. Elas são:

Diagrama de Pareto usa o princípio de Pareto, segundo o qual 80 % dos efeitos devem-se a 20 % das causas, para seleccionar os problemas mais críticos e priorizar as ações.

Diagrama de causa-efeito é uma ferramenta a ser usada num contexto de *brainstorming* que incentiva à enumeração de todas as causas possíveis para um dado efeito.

Estratificação consiste na separação dos dados agregados por fatores, elucidando o analista acerca dos efeitos destes. Por exemplo, separar o número de peças defeituosas por máquina pode revelar que a grande maioria dos defeitos são gerados por uma só máquina³.

Folha de verificação forma simples de contabilizar ocorrências como defeitos, causas e medições, revelando padrões de forma visual e muito rápida.

Histograma separa as observações de uma variável em diversos intervalos e representa a frequência de observações em cada intervalo sob a forma de um gráfico de barras. Isto permite visualizar a distribuição da variável em estudo.

Diagrama de dispersão representa cada observação num sistema de duas coordenadas. Um eixo representa a variável em estudo e o outro representa uma outra variável explanatória da primeira. A leitura do gráfico permite confirmar ou rejeitar a hipótese de correlação entre as duas variáveis.

Carta de controlo ferramenta estatística e gráfica utilizada no controlo de processo. Ver a secção 2.1.4.

Estas técnicas são simples mas poderosas na identificação e solução de problemas de qualidade e têm sido usadas há décadas (Pyzdek e Keller 2003, 393). As suas grandes vantagens em relação a técnicas mais sofisticadas como as apresentadas em 2.2.3 são o facto de poderem ser usadas por todos os colaboradores (Liker 2006, cap. 13) e o *feedback* extremamente rápido que proporcionam (Liker 2006, 404).

2.2.3 Outras ferramentas estatísticas

Apresentam-se agora algumas ferramentas estatísticas mais avançadas também aplicadas na melhoria de processos. Além das que descrevemos a seguir existem duas outras de grande importância: a análise de sistemas de medição e o planeamento de experiências, que serão apresentadas em detalhe nas duas secções seguintes.

Testes de hipóteses

Um teste de hipóteses é uma técnica estatística usada para confirmar ou rejeitar hipóteses estatísticas. Estas são definidas por Montgomery e Runger (2010, 285) como uma afirmação sobre os parâmetros de uma ou mais populações.

Num teste de hipóteses existem sempre duas hipóteses. A hipótese nula H_0 é aquela que é assumida como verdadeira até prova em contrário. A hipótese alternativa H_1 é a afirmação que queremos testar. O teste estatístico consiste em calcular a probabilidade de os dados

³ A técnica de estratificação é substituída pelo fluxograma em alguns textos (Oakland 2008, 18; Pyzdek e Keller 2003, cap. V.C). Oakland (2008, 18) junta ainda o gráfico de série temporal a estas sete ferramentas.

assumirem os valores que apresentam sob o pressuposto da hipótese nula ser verdadeira. Caso essa probabilidade seja mais baixa que um nível de confiança α definido pelo analista a H_0 é rejeitada e H_1 é assumida como verdadeira.

Dada a natureza destes testes, existe um erro associado. O erro de tipo I é definido como a rejeição de H_0 quando esta é verdadeira. A probabilidade de ocorrência deste erro é igual a α . O erro de tipo II é a não rejeição de H_0 quando esta é falsa. A probabilidade de ocorrência deste tipo de erro é denominada por β e depende de α , da distribuição da população, da diferença entre as duas hipóteses e do tamanho da amostra⁴.

Análise de variância

A análise de variância (ANOVA) é uma outra técnica estatística que permite inferir sobre duas ou mais populações através da análise da variabilidade nos dados. Esta análise assenta na decomposição da variabilidade total numa componente atribuível a um fator e noutra componente atribuível ao erro.

Suponha-se que se dispõe de um conjunto de dados que representa o número de defeitos produzidos em cada turno (manhã, tarde e noite) nos últimos 15 dias de produção. Pretende-se testar se há diferenças significativas entre os 3 turnos. A variabilidade total pode ser representada pelo somatório dos desvios quadráticos em relação à média total dos dados \bar{y} como apresentado na equação 2.10.

$$SS_T = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^{15} (y_{ij} - \bar{y})^2 \quad (2.10)$$

A variabilidade devida aos diferentes turnos é representada pelos desvios quadráticos da média de cada turno em relação à média total. A variabilidade devida ao erro é calculada através dos desvios de cada observação em relação à média do seu turno. A equação 2.11 mostra a decomposição da variabilidade total nestas duas componentes.

$$SS_T = SS_{\text{turno}} + SS_{\text{erro}} \Leftrightarrow \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^{15} (y_{ij} - \bar{y})^2 = 15 \sum_{i=1}^3 (\bar{y}_i - \bar{y})^2 + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^{15} (y_{ij} - \bar{y}_i)^2 \quad (2.11)$$

Ao comparar SS_{turno} com SS_{erro} é possível chegar a conclusões acerca das diferenças entre os três turnos. Pode-se desenhar um teste de hipóteses com a seguinte configuração:

$$\begin{aligned} H_0 : \mu_{\text{manhã}} &= \mu_{\text{tarde}} = \mu_{\text{noite}} \\ H_1 : \text{pelo menos um } \mu_i &\text{ é diferente} \end{aligned}$$

Para tal usam-se os desvios quadráticos médios devido aos turnos (MS_{turno}) e devido ao erro (MS_{erro}) (eq. 2.12 e 2.13) como componentes de uma estatística de teste F_0 . Assumindo que os

⁴ver Montgomery e Runger (2010, 288–290) para um exemplo do cálculo de β .

resíduos seguem uma distribuição Normal é possível demonstrar que o rácio $MS_{\text{turno}}/MS_{\text{erro}}$ segue uma distribuição $F_{3-1,3(15-1)}$. Se houver diferenças devido aos turnos então MS_{turno} será maior do que o esperado e por isso deve-se rejeitar H_0 se $F_0 > F_{\alpha,3-1,3(15-1)}$ (Montgomery e Runger 2010, 142–146).

$$MS_{\text{turno}} = \frac{SS_{\text{turno}}}{3 - 1} \quad (2.12)$$

$$MS_{\text{erro}} = \frac{SS_{\text{erro}}}{3(15 - 1)} \quad (2.13)$$

2.3 Análise de sistemas de medição

Um sistema de medição de confiança é essencial à monitorização de um processo e ainda mais importante na melhoria do mesmo. Nas palavras de Burdick, Borror e Montgomery (2005, 1):

“To properly monitor and improve a manufacturing process, it is necessary to measure attributes of the process output. For any group of measurements collected for this purpose, at least part of the variation is due to the measurement system. This is because repeated measurements of any particular item do not always result in the same value. To ensure that measurement system variability is not harmfully large, it is necessary to conduct a measurement systems capability study.”

Para compreender a influência do sistema de medição é necessário conhecer as suas propriedades e quantificar a sua variabilidade.

2.3.1 Propriedades de um sistema de medição

Um sistema de medição capaz tem cinco propriedades (Pyzdek e Keller 2003, cap. III.D):

Exatidão valor medido é suficientemente próximo do valor verdadeiro.

Precisão medições do mesmo produto produzem resultados suficientemente próximos.

Reprodutibilidade o sistema produz os mesmos valores independentemente do seu operador.

Linearidade manter a exatidão e precisão ao longo de todo o espectro de valores da propriedade a ser medida.

Estabilidade produzir as mesmas medições ao longo do tempo.

Os fatores que podem influenciar estas propriedades são variados e incluem:

- Instrumentos de medição e respetiva discriminação⁵;
- Métodos de medição variáveis;

⁵A discriminação de um instrumento de medição é a diferença mínima que este consegue detetar. Por exemplo, um paquímetro digital pode efetuar leituras até 0.01 mm enquanto um paquímetro analógico pode conseguir uma discriminação de apenas 0.05 mm.

- Condições ambientais;
- Calibração do instrumento de medição;
- Desgaste do instrumento de medição.

2.3.2 A técnica Gauge R&R

Um estudo *Gauge R&R* (Repetitividade e Reprodutibilidade do Instrumento de medição) consiste num conjunto de experiências e respetiva análise estatística que permite quantificar as propriedades de precisão e reprodutibilidade de um sistema de medição. Segundo Burdick, Borror e Montgomery (2005, 2), os objetivos de tal estudo são:

1. Determinar a quantidade de variabilidade que é devida ao sistema de medição;
2. Isolar as fontes de variabilidade no sistema de medição;
3. Determinar se o sistema de medição é apropriado à sua aplicação.

É possível desenhar as experiências mais variadas para este tipo de estudo (Burdick, Borror e Montgomery 2005), mas os estudos mais comuns são os recomendados no manual *Measurement system analysis* (AIAG 2002). Este manual recomenda duas configurações:

Curta 5 peças medidas por 2 operadores, 2 vezes cada uma.

Longa 10 peças medidas por 3 operadores, 3 vezes cada uma.

Os resultados destas experiências são depois analisados a partir de um modelo ANOVA de efeitos variáveis (Burdick, Borror e Montgomery 2005, cap. 3) representado pela equação 2.14. O modelo assume que a variável de resposta a ser medida Y depende de uma constante μ_Y e de um conjunto de variáveis P_i , O_j , $(PO)_{ij}$ e E_{ijk} independentes e normalmente distribuídas com valor esperado 0 e variâncias σ_P^2 , σ_O^2 , σ_{PO}^2 e σ_E^2 , respetivamente. Os termos do modelo representam, respetivamente, o valor esperado de Y , o efeito das peças, o efeito dos operadores, o efeito da interação entre peças e operadores e ainda o erro do modelo ou, de forma mais prática, o efeito da precisão do sistema de medição. Os índices i , j e k representam indicam a peça, o operador e a observação, respetivamente. Num sistema capaz, a variância σ_P^2 deve ser muito maior que as outras, uma vez que isto significa que a maior parte da variabilidade provém de diferenças reais entre as peças e não das diferenças entre operadores (σ_O^2) ou das diferenças entre medições repetidas (σ_E^2).

$$Y_{ijk} = \mu_Y + P_i + O_j + (PO)_{ij} + E_{ijk} \quad (2.14)$$

2.3.3 Indicadores de capacidade de sistemas de medição

Para obter um indicador para a capacidade do sistema de medição, a abordagem mais comum é quantificar a percentagem de variação devida ao sistema. Existem vários indicadores baseados neste princípio mas os mais comuns são os usados no manual da AIAG (2002). A *percentagem de variação total do estudo* (eq. 2.19) compara a variação devida ao sistema de medição com a variação total observada no estudo. O *rácio precisão/tolerância* (eq. 2.20) compara a amplitude do intervalo de confiança a 99.73 % do erro de medição⁶ com a amplitude da tolerância.

$$\text{Repetitividade} = \sigma_E \quad (2.15)$$

$$\text{Reprodutibilidade} = \sqrt{\sigma_O^2 - \frac{j}{ijk} \text{Repetitividade}^2} \quad (2.16)$$

$$\text{R\&R} = \sqrt{\text{Repetitividade}^2 + \text{Reprodutibilidade}^2} \quad (2.17)$$

$$\text{Variação total} = \sigma_P \quad (2.18)$$

$$\% \text{ Variação do estudo} = \frac{\sqrt{\text{R\&R}^2}}{\sqrt{\text{Variação total}^2}} \quad (2.19)$$

$$\text{PTR} = \frac{6 \times \text{R\&R}}{\text{Tolerância}} \quad (2.20)$$

Estes indicadores, apesar de amplamente usados, têm vários problemas de interpretação e de subestimação da capacidade do sistema (Wheeler 2010). Em vez do indicador *% Variação do estudo* é mais correto usar o indicador *Signal to Noise Ratio* (eq. 2.22) como descrito por Burdick, Borror e Montgomery (2005, 4). Este é definido a partir do rácio entre a variância do processo e a variância do sistema de medição, que é notado por γ_R . Como requisito mínimo, o sistema deve conseguir $\text{SNR} > 1$, sendo que $\text{SNR} \geq 5$ é o recomendado.

$$\gamma_R = \frac{\sigma_P^2}{\sigma_O^2 + \sigma_{PO}^2 + \sigma_E^2} \quad (2.21)$$

$$\text{SNR} = \sqrt{2\gamma_R} \quad (2.22)$$

Como alternativa ao *rácio precisão/tolerância*, Wheeler (2011) apresenta o uso de *especificações de fabrico*. O seu método consiste em estreitar a banda de tolerância para que o erro de medição seja tido em conta, garantindo assim a correta classificação do produto.

Usando o conceito de *erro provável* (eq. 2.23) do sistema de medição, é possível provar que estreitando a tolerância em quatro erros prováveis pelo menos 96 % dos produtos estarão conforme as especificações. Uma vez que essa percentagem é baseada no pressuposto de que apenas 50 % do produto está conforme, esta é de natureza conservadora e por isso Wheeler (2011) recomenda o

⁶Para a construção deste intervalo de confiança, assume-se que o erro segue uma distribuição normal de valor esperado 0 e desvio-padrão R&R. O fator 6 na eq. 2.20 multiplicado por R&R resulta num intervalo com 6 desvios-padrão de amplitude, o que equivale a 99.73 % dos valores da distribuição do erro de medição.

uso de quatro erros prováveis. Usando este conceito é possível chegar a um indicador alternativo para o rácio precisão/tolerância e que poderá ser denominado *perdas de tolerância* (eq. 2.24).

$$\text{Erro provável} = 0.675 \sqrt{\sigma_O^2 + \sigma_{PO}^2 + \sigma_E^2} = 0.675 \sigma_M \quad (2.23)$$

$$\text{Perdas de tolerância} = \frac{4 \times \text{Erro provável}}{\text{Tolerância}} \quad (2.24)$$

2.4 Planeamento de experiências

O planeamento de experiências é uma ferramenta estatística que permite desenhar um conjunto de testes para determinar (Montgomery 2009, 550):

- os fatores que influenciam significativamente uma variável de resposta y .
- os valores dos fatores significativos x_i para que y assuma valores perto do nominal.
- os valores de x_i para que a variabilidade de y seja pequena.
- os valores de x_i que minimizam o efeito das variáveis incontrolláveis z_j .

O plano de experiências depende essencialmente das particularidades do processo em questão e da focalização nos fatores a testar, os seus valores típicos e a sua variabilidade, entre outros.

2.4.1 Experiências planeadas estatisticamente

A forma mais simples de planejar um conjunto de experiências em que existem vários fatores a ter em conta é usar o princípio *ceteris paribus*, mantendo todas as variáveis constantes exceto aquela cujo efeito se quer testar. No entanto, esta abordagem tem várias falhas que são eliminadas quando a experiência é planeada estatisticamente. Uma experiência bem planeada permitirá (Pyzdek e Keller 2003, cap. VI.F):

- Detetar interações entre fatores. Uma interação entre dois fatores existe quando o nível de um fator influencia a diferença entre níveis de um outro fator (Montgomery 2000, 170). A Figura 2.4 clarifica este conceito.
- Obter resultados com menos observações. Uma observação é usada na estimação de diferentes efeitos.
- Retirar conclusões com um grau de confiança quantificável.

Num estudo de 77 artigos relacionados com planeamento de experiências, Ilzarbe et al. (2008) mostram que, em 77 % dos casos, os objetivos do estudo foram atingidos com apenas 30 ou menos experiências. Este resultado prova a eficiência estatística do desenho de experiências.

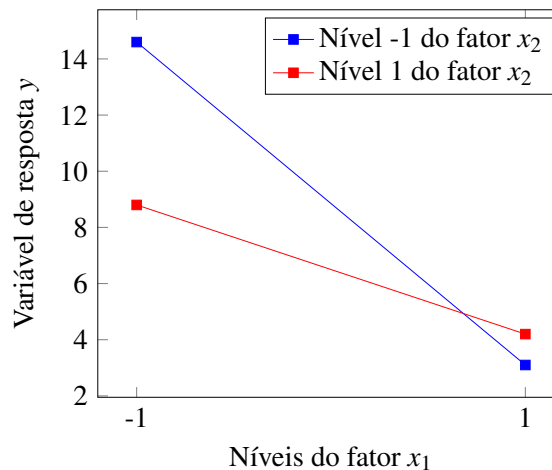


Figura 2.4: Efeito da interação entre dois fatores na variável de resposta de um processo.

2.4.2 Princípios básicos no planejamento de experiências

Existem três conceitos muito importantes no planejamento de experiências: aleatorização, replicação e loteamento. Para obter resultados válidos é essencial compreender e aplicar estes três princípios (Burdick, Borror e Montgomery 2005, cap. 4).

A aleatorização consiste em executar as experiências em ordem aleatória. Por exemplo, num conjunto de experiências que pretende verificar se um fator x influencia significativamente uma variável de resposta y : decide-se realizar seis experiências, com seis níveis diferentes de x ; se as experiências se realizarem por ordem crescente dos níveis de x , corre-se o risco de se detetar um efeito significativo que na verdade se deve a uma mudança num fator ruído ao longo das experiências enquanto que se realizarmos as experiências por ordem aleatória, o efeito desse fator ruído será difundido pelos vários níveis de x e será identificado como erro experimental.

A replicação é simplesmente a condução de uma réplica do conjunto de experiências. Deve-se assegurar que as réplicas são efetuadas de forma independente umas das outras: através da condução de réplicas pretende-se estimar o erro experimental e a melhoria da precisão na estimação dos efeitos dos fatores em estudo.

O loteamento é uma técnica usada para lidar com fatores que influenciam significativamente a variável de resposta em estudo, mas o seu efeito não é relevante para o objetivo das experiências a serem conduzidas. Um exemplo clarificador é um conjunto de experiências que usa um dado material produzido em lotes: se o material de um lote não é suficiente para realizar todas as experiências, é necessário lotear as experiências, usando um lote de material em cada grupo a testar para assegurar homogeneidade nas condições experimentais.

2.4.3 Experiências completamente fatoriais

Um desenho experimental simples e muito útil consiste na realização de testes com todas as combinações possíveis de fatores e respetivos níveis. Este desenho permite estimar os efeitos principais de cada fator bem como todas as interações duplas e de mais alta ordem.

O caso mais simples de uma experiência completamente fatorial é o caso 2^2 em que dois fatores são testados a dois níveis cada. Denominando os níveis de cada fator por 1 e -1 , as quatro experiências a realizar serão as constantes da Tabela 2.2.

Tabela 2.2: As quatro experiências num desenho experimental 2^2 .

	x_1	x_2
1	1	1
2	1	-1
3	-1	1
4	-1	-1

A análise estatística destas experiências é feita a partir de uma generalização da técnica ANOVA a mais do que um fator e o modelo estatístico que serve de base a esta análise é o expresso na equação 2.25, em que μ é o efeito da média global das experiências, τ_i é o efeito principal do nível i do fator x_1 , β_j é o efeito principal do nível j do fator x_2 , $(\tau\beta)_{ij}$ é o efeito da interação entre x_1 e x_2 e ε_{ijk} é o erro do modelo, k representando a réplica.

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (2.25)$$

O desenho de experiências completamente fatorial é muito útil na exploração inicial de um processo, sendo normalmente usado com apenas dois níveis relativamente extremos de cada fator. Permite detetar facilmente quais os fatores e interações significativas, que poderão ser estudados em maior detalhe em experiências posteriores.

2.4.4 Experiências split-plot

O princípio de aleatorização é essencial para o correto planeamento de experiências, no entanto, podem existir vários entraves à completa aleatorização. A mais comum é o facto de um ou mais fatores em estudo serem difíceis de mudar. Por exemplo, a temperatura de um forno pode demorar vários minutos a chegar à nova temperatura desejada. Se a ordem das experiências for completamente aleatória, haverá muitas mudanças de temperatura, aumentando o tempo entre experiência e, consequentemente, o custo do estudo. Seria mais conveniente realizar todas as experiências que exijam a temperatura mais baixa, subir a temperatura e então realizar as experiências que exijam a temperatura mais alta.

Existe um desenho experimental que tem em conta esta limitação na aleatorização das experiências, permitindo assim estudos mais curtos e mais baratos. Estes planos são denominados *split-plot*. O fator de difícil mudança constitui o *tratamento principal* ou *whole plot* e os restantes fatores fazem parte dos tratamentos *subplot*. Este desenho experimental pode ser visto como uma combinação de duas experiências. O fator *whole plot* é aplicado ao conjunto de experiências *subplot*, dentro do qual os tratamentos dos fatores de fácil mudança são aplicados aleatoriamente como numa experiência completamente fatorial (Montgomery 2000, 574–575).

O modelo estatístico apresentado na equação 2.26 para um desenho com dois fatores evidencia este conceito de combinação de experiências. Aqui, τ_i representa o lote ou réplica i , β_j o

nível j do fator de difícil mudança e γ_k o nível k do fator de fácil mudança. $(\tau\beta)_{ij}$ e $(\tau\beta\gamma)_{ijk}$ representam o erro do *whole plot* e do *subplot*, respetivamente.

$$y_{ijk} = \mu + \overbrace{\tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij}}^{\text{whole plot}} + \overbrace{\gamma_k + (\tau\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk}}^{\text{subplot}} + \varepsilon_{ijk} \quad (2.26)$$

2.4.5 Response Surface Methodology

O desenho de experiências usados na técnica *Response Surface Methodology* (RSM) têm como objetivo otimizar uma variável de resposta ao construir um modelo regressivo dependente dos fatores em estudo.

Este tipo de testes são normalmente conduzidos de forma sequencial em que os resultados do primeiro conjunto de experiências são usados no desenho experimental seguinte (Montgomery 2009, 604–605). Por exemplo, o primeiro conjunto de experiências permite construir um modelo linear com dois fatores, representado pelo gráfico de contorno na Figura 2.5a. Assumindo que se pretende maximizar a variável de resposta, conduz-se um conjunto de experiências com valores de x_1 mais baixos e valores de x_2 mais altos, sendo possível calcular exatamente qual a direção que estes valores devem tomar para maximizar a variável de resposta. Ao realizar esta nova experiência, os resultados podem mostrar que um modelo linear já não é suficiente para caracterizar y em função de x_i . Sendo assim, realizam-se mais experiências por forma a construir um modelo quadrático, representado pela Figura 2.5b.

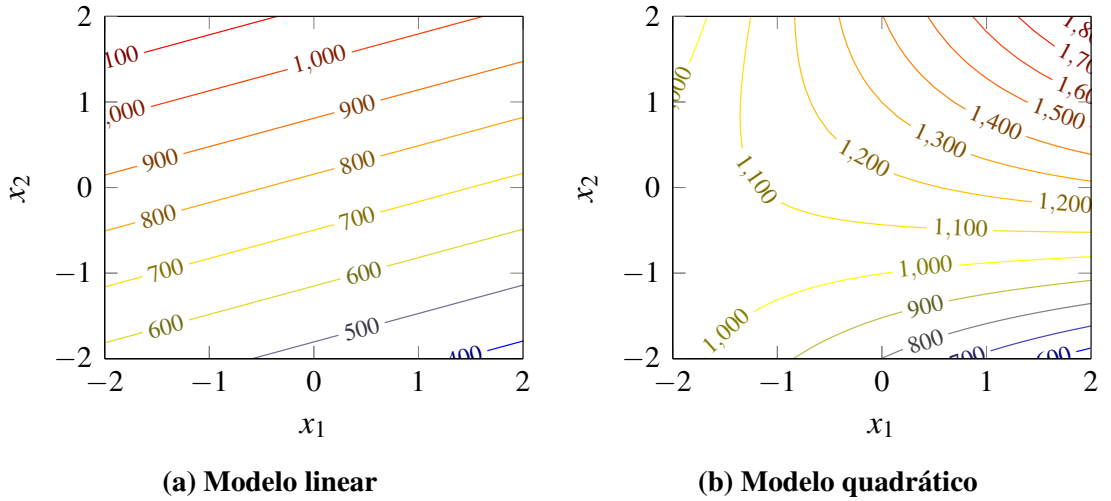


Figura 2.5: Gráficos de contorno de modelos obtidos a partir de desenhos experimentais do tipo RSM.

O desenho de experiências mais usado na otimização de processos é denominado *central composite design* (CCD) (Montgomery 2000, sec. 11-4). É um desenho de dois níveis, completamente fatorial, que elege um conjunto de pontos centrais usados para estimar o erro experimental.

Na construção de modelos de segunda ordem é também necessário usar pontos axiais. A Figura 2.6 clarifica os níveis de configuração dos fatores em cada uma das experiências⁷. É comum registarem-se quatro observações no ponto central.

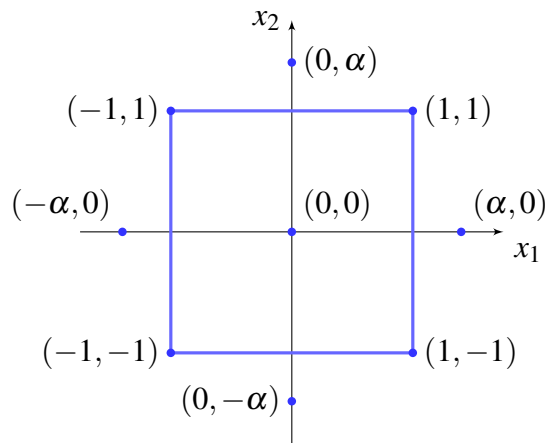


Figura 2.6: *Central composite design* para um modelo de segunda ordem de dois fatores.

⁷O valor de α depende essencialmente da região de interesse. Ver Montgomery (2000, 456–461) para uma discussão das implicações da escolha deste valor.

3 Definição do problema

3.1 Processo de fabrico de uma embalagem para aerossol

A embalagem para aerossol produzida na Colep é composta por três peças: fundo, corpo e cúpula (ver Figura 3.1). O corpo é enrolado e soldado e posteriormente o fundo e cúpula são fixados ao corpo por um processo denominado de *cravação dupla*. Neste processo, os materiais do corpo e do componente a cravar (fundo ou cúpula) são enrolados um sobre o outro, resultando numa sobreposição de camadas de material do corpo e do componente. A Figura 3.2 mostra um esquema de uma cravação dupla. Para garantir a hermeticidade da embalagem é aplicada à orla de cada componente um filme de vedante cuja função é preencher os espaços vazios na cravação.

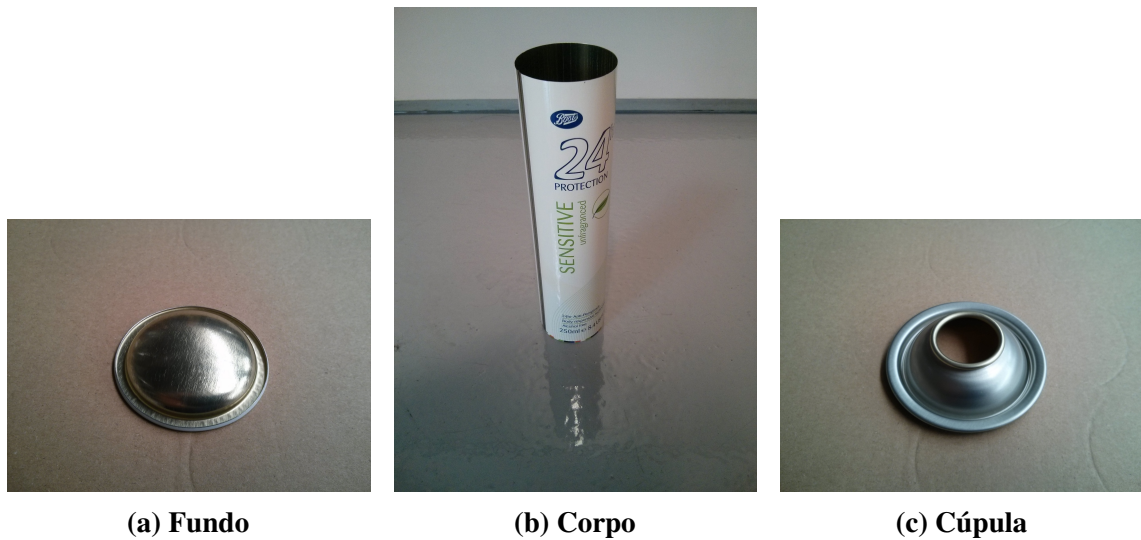


Figura 3.1: As três peças de uma embalagem para aerossol.

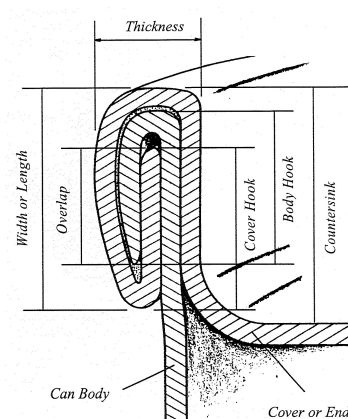


Figura 3.2: Esquema de uma cravação dupla entre corpo e fundo. Fonte: <http://www.doubleseam.com/a-finished-double-seam/a-finished-double-seam>.

O fluxo geral do processo pode ser apreendido pelo fluxograma apresentado na Figura 3.3. Estão-se a excluir as operações de corte primário¹, litografia² e corte secundário³ que se realizam a montante das operações presentes na Figura 3.3.

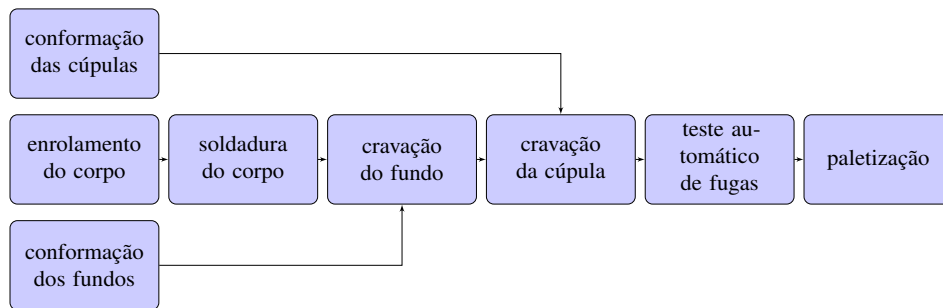


Figura 3.3: Fluxograma geral do processo produtivo.

3.2 Processo de aplicação de vedante

O vedante aplicado nos componentes é uma dispersão coloidal de base aquosa. As partículas dispersas são uma combinação de borrachas naturais e sintéticas. A dispersão é aplicada por um injetor na orla do componente formando um filme de *borracha húmida* (Figura 3.4). Os componentes passam depois por um forno cuja função é provocar a evaporação da água, deixando um filme de *borracha seca*. Os fornos usados para secar a borracha são de dois tipos: injeção de ar quente ou resistências e placas de cerâmica (Figura 3.5). Sendo os fornos contínuos, o tempo de permanência no forno depende da cadência de produção da linha.

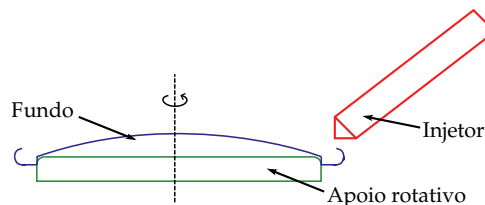


Figura 3.4: Esquema do injetor de borracha.

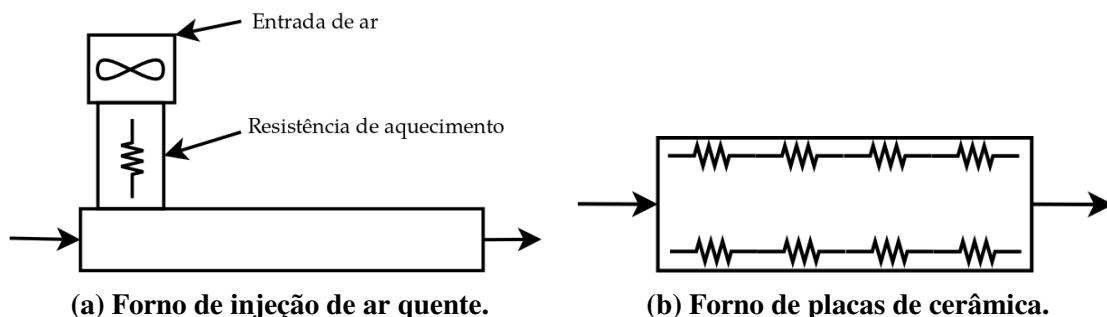


Figura 3.5: Esquemas dos dois tipos de fornos existentes.

¹Corte da bobina de matéria-prima em tamanhos apropriados para as operações de litografia.

²Aplicação de revestimentos e tintas à folha-de-flandres.

³Corte das folhas litografadas em corpos individuais ou em folhas mais pequenas apropriadas para as operações de conformação.

A regulação da temperatura depende do tipo de forno. Os fornos de placas de cerâmica têm termômetros no interior do forno que permitem regular a temperatura com considerável precisão a partir da potência das resistências. Os fornos de injeção de ar quente permitem a regulação da potência da resistência que aquece o ar a injetar. No entanto, estes fornos não têm termômetros internos, impossibilitando assim o ajuste da temperatura de forma precisa.

O sistema de aplicação de vedante é composto por vários equipamentos (Figura 3.6). A borracha húmida é transferida dos bidões de transporte para o recipiente da central de distribuição. A borracha é depois bombeada para as diferentes linhas onde existe um regulador que diminui a pressão de borracha fornecida ao injetor. Isto permite controlar a quantidade de borracha aplicada em cada linha. Para controlar o período de tempo durante o qual o injetor está aberto e a aplicar borracha, existe um temporizador que é acionado pela deteção de um componente no mandril. O tempo de aplicação deve estar configurado em função da velocidade do mandril para garantir uma distribuição uniforme de borracha.

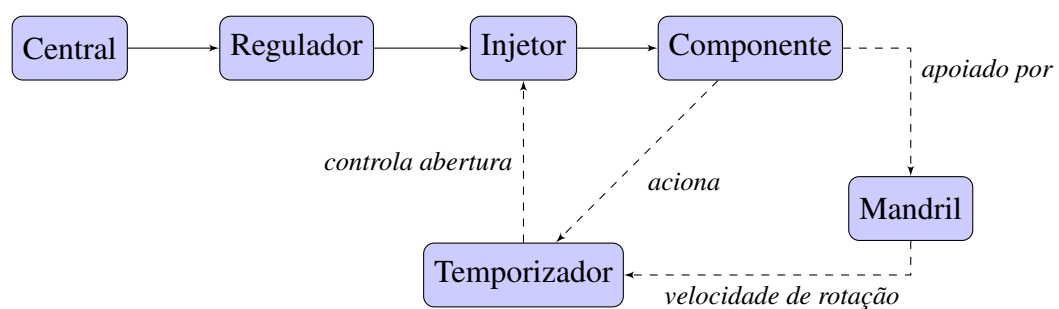


Figura 3.6: Sistema de aplicação de vedante.

Nas linhas de fundos, as prensas produzem dois componentes a cada ciclo. Cada um destes é tratado por máquinas de borracha e fornos diferentes, como mostra a Figura 3.7.

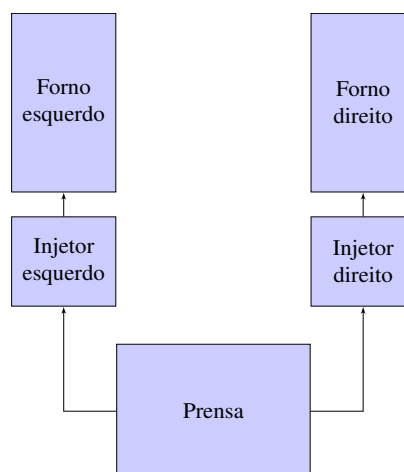


Figura 3.7: Esquema de uma linha de fundos com duas pistas.

3.3 Defeitos relacionados com o vedante

Os defeitos relacionados com a aplicação da borracha são variados e todos eles, exceto o último, podem originar fugas na embalagem final. Os defeitos mais comuns são:

- Quantidade de borracha fora das especificações;
- Excesso de humidade residual na borracha;
- Falhas de borracha (Figura 3.8a);
- Deficiente distribuição da borracha (Figura 3.8b); cerca de 80 % do vedante deve estar localizado por baixo da orla do componente;
- Bolhas no filme de borracha (Figura 3.8c);
- Borracha fora da zona de cravação (Figura 3.8d).

Todas estas causas podem originar fugas na embalagem final. No entanto, como há muitas outras causas de fugas, o defeito dessas embalagens não pode ser imediatamente imputado a defeitos relacionados com a borracha.

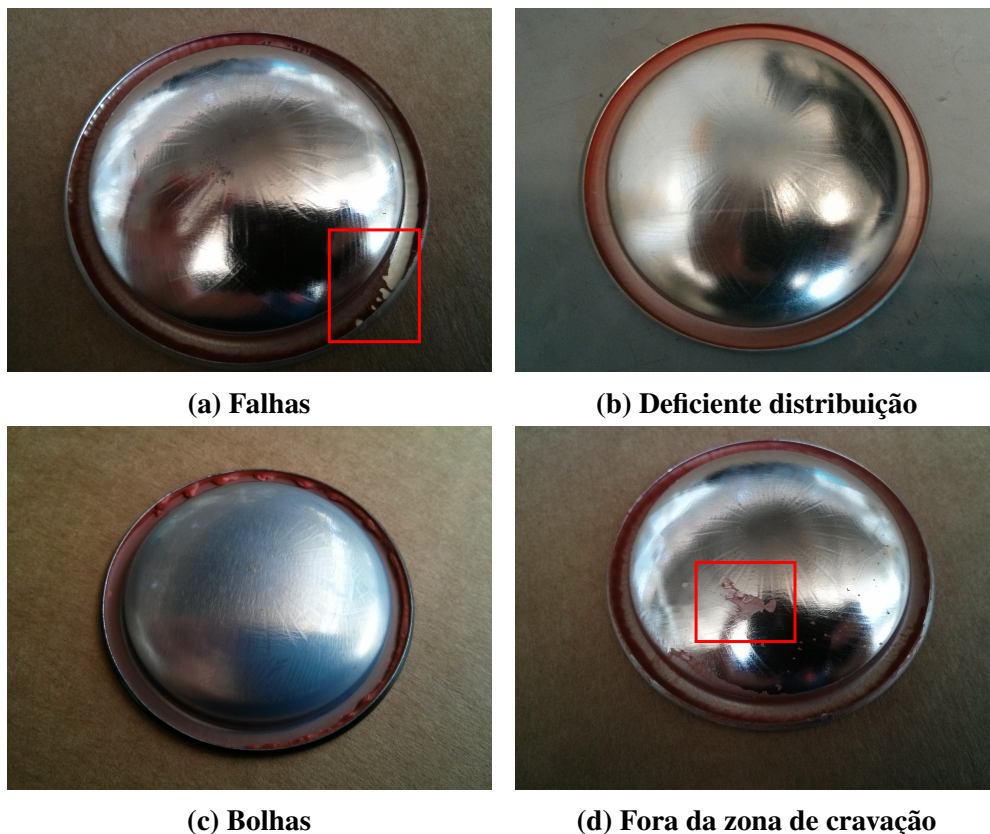


Figura 3.8: Defeitos relacionados com o vedante detetáveis por inspeção visual.

Cada diâmetro dos componentes tem uma especificação nominal de quantidade de borracha a aplicar, dada em miligramas por fundo. A tolerância desta especificação é de $\pm 10\%$. Para a humidade residual no filme de borracha, a especificação dada pelo fornecedor é no máximo

de 2 %. Além da passagem pelo forno, o fornecedor recomenda ainda um período de 48 h de quarentena até à cravação como forma de garantir a especificação de humidade residual, visto que esta dispersão permite a evaporação da água à temperatura ambiente. Os processos atuais de secagem não são capazes de garantir uma humidade residual abaixo dos 2 % e o período de quarentena nem sempre é cumprido para que não haja paragens por falta de material nas linhas de montagem.

Como já foi dito, estes defeitos podem dar origem a fugas na montagem da embalagem final. No entanto, como há muitas outras causas de fugas, o defeito dessas embalagens não pode ser imediatamente imputado a defeitos relacionados com o vedante. A borracha fora da cravação, causada por excesso de borracha ou por excesso de humidade residual é o defeito crítico estudado nesta dissertação porque é o que causa mais problemas à Empresa.

A Figura 3.9 apresenta dois exemplos deste defeito. O representado na Figura 3.9a pode ser causado por excesso de borracha ou por excesso de humidade residual e em casos pouco críticos como este pode implicar apenas o *retrabalho* de limpar a borracha fora da cravação. O defeito na Figura 3.9b é causado por excesso de humidade residual.



(a) Caso não crítico.



(b) Excesso de humidade residual.

Figura 3.9: Defeitos de borracha fora da cravação.

3.4 Controlo do processo

Os defeitos detetáveis por inspeção visual são controlados através de inspeção por parte dos operadores em intervalos de 15 minutos. Para o controlo da quantidade de borracha aplicada e da humidade residual, foi implementado recentemente um novo sistema de inspeção.

O processo era controlado através da diferença entre a massa de uma amostra, antes da aplicação, e outra depois da aplicação e secagem. A diferença entre essas duas pesagens corresponderá à massa de borracha existente nessa amostra após a aplicação e a secagem. Essa massa de borracha, designada por *peso seco* deve cumprir especificações recomendadas pelo fornecedor.

Com o novo procedimento pretende-se obter informação independente acerca dos dois processos envolvidos: aplicação e secagem. Efetuam-se três pesagens: antes da aplicação, após a aplicação e após a secagem. A diferença entre as primeiras duas pesagens informa sobre a quantidade de borracha aplicada, ou *peso húmido*, e a diferença entre as últimas duas pesagens informa sobre a

humidade perdida durante o processo de secagem, permitindo calcular a humidade residual (H_R) através da equação 3.1.

$$H_R = H_B - \frac{P_H - P_S}{P_H} = 0.325 - \frac{(m_{BH} - m_{SB}) - (m_{BS} - m_S)}{m_{BH} - m_{SB}} \quad (3.1)$$

m_{SB} massa da amostra sem borracha

m_{BH} massa da amostra com borracha húmida antes de entrar no forno

m_{BS} massa da amostra com borracha seca à saída da linha

m_S massa da amostra após a secagem total na estufa

P_H peso húmido

P_S peso seco—massa de borracha na amostra após a secagem

H_B humidade inicial da borracha especificada pelo fornecedor

Esta não é a forma mais precisa de se medir a humidade residual, embora obtenha aproximações satisfatórias. O método mais correto envolve secar totalmente as amostras numa estufa a 120 °C durante 30 minutos e calcular a humidade residual a partir da equação 3.2, em que m_S é a massa da amostra após secagem total na estufa.

$$H_R = \frac{m_{BS} - m_S}{m_{BS} - m_{SB}} = \frac{m_{BS} - m_S}{P_S} \quad (3.2)$$

Se o valor de peso húmido se encontrar fora das especificações, o operador ajusta a pressão de aplicação no regulador de pressão. O valor de humidade residual é apenas registado, não dando origem a qualquer ação.

Apresentado o processo em estudo, os defeitos mais comuns e ainda o controlo do processo, está também definido o problema: identificar e analisar os fatores que influenciam o processo, com focalização nos que originam o defeito de borracha fora da cravação. Do estudo esperam-se conclusões e propostas para a melhoria da qualidade.

4 Diagnóstico do processo

4.1 Aplicação de vedante

A qualidade da aplicação de vedante é determinada essencialmente pela quantidade de borracha aplicada. Para cada diâmetro de componentes, existe uma quantidade nominal em mg/componente. Os limites de especificação são definidos como $\pm 10\%$ dessa quantidade. A quantidade de borracha aplicada é medida através da variável *peso húmido*, normalmente expressa em mg/fundo. No entanto, para permitir comparação entre linhas, é mais apropriado transformar essa variável em desvio percentual em relação ao nominal (eq. 4.1)

$$P_H^{\%} = \frac{P_H - P_H^{nominal}}{P_H^{nominal}} \quad (4.1)$$

A Figura 4.1 mostra um histograma da variável *peso húmido* construído a partir dos dados recolhidos pelos operadores no controlo do processo. Como se pode observar, existe uma grande quantidade de observações em que a quantidade de borracha está fora das especificações¹, representada pelas linhas verticais a vermelho. Estas observações, aliadas à alta frequência dos controlos de qualidade (2 em 2 horas) e à constante necessidade de ajustar a pressão de injeção para obter medições conforme, sugerem que o processo se encontra num estado descontrolado e instável. Isto quer dizer que não é possível garantir a conformidade do filme de borracha porque mesmo que o controlo de qualidade seja bem sucedido, a instabilidade do processo fará com que se produzam defeitos até ao próximo controlo.

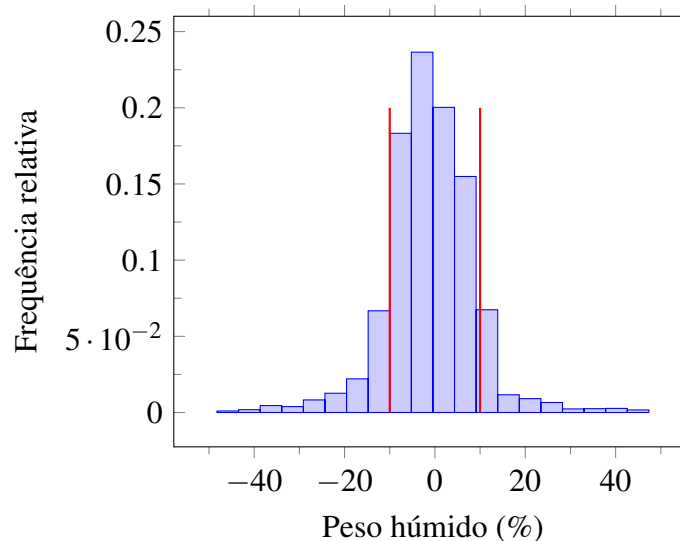


Figura 4.1: Histograma do desvio percentual em relação ao nominal de peso húmido.

¹Na verdade, a quantidade de defeitos é ainda maior do que a registada pois veio-se a descobrir que muitos dos operadores apenas registavam as suas medições se o controlo estivesse conforme.

4.2 Secagem

A eficácia do processo de secagem é determinado pela *humidade residual*, ou seja, a quantidade de água (em percentagem da massa total de vedante) que subsiste no filme de borracha após a sua passagem no forno. A Figura 4.2 mostra o histograma desta variável de resposta, construído a partir dos dados recolhidos pelos operadores no controlo do processo. Como se pode ver, o processo está longe de conseguir cumprir a especificação de 2 % à saída da linha, representada pela linha vertical a vermelho.

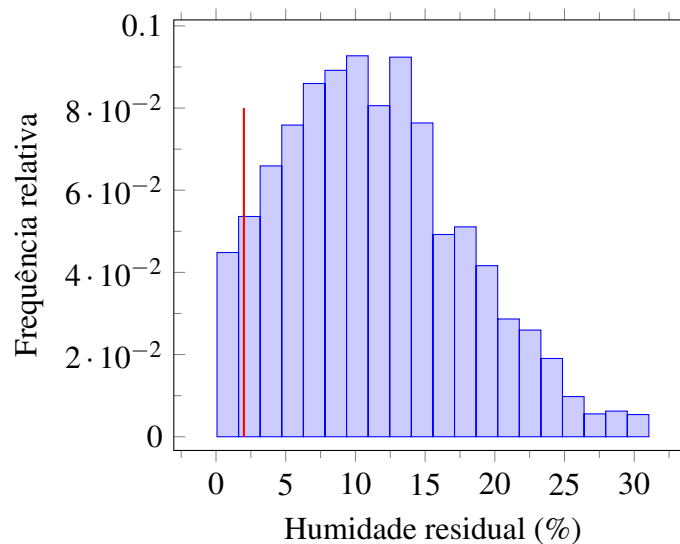


Figura 4.2: Histograma da humidade residual.

Os defeitos de borracha fora da cravação acontecem muito mais frequentemente nos fundos do que nas cúpulas. A experiência na Colep sugere duas causas para esta observação:

- Temperatura superior das cúpulas antes da aplicação da borracha.
- Espaçamento entre componentes no forno é superior nas cúpulas.

A primeira causa deve-se ao facto de as cúpulas, por terem geometria mais complexa, sofrerem mais operações de conformação (sete operações contra uma nos fundos) que aumentam a temperatura do componente ainda antes da aplicação da borracha. Acredita-se que esta temperatura mais alta auxilia a secagem. A segunda causa deve-se à orla superior da cúpula que provoca um espaçamento entre cúpulas nas linhas, permitindo assim uma evaporação mais eficaz durante a passagem no forno. A Figura 4.3 mostra a diferença entre o espaçamento no caso dos fundos e das cúpulas.

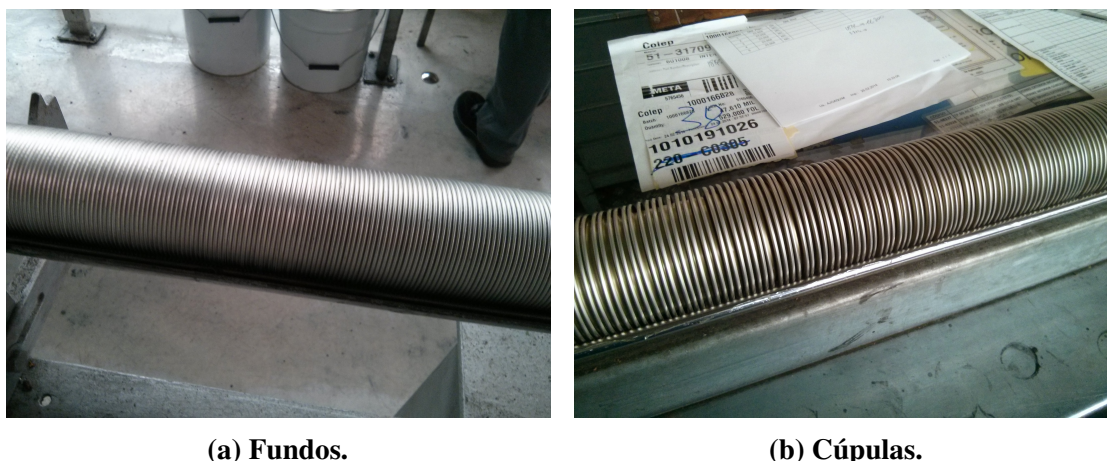


Figura 4.3: Comparação do espaçamento na linha entre componentes.

Os fornos mostram algumas deficiências em relação às recomendações do fornecedor. Este recomenda que os componentes permaneçam no forno durante cerca de 3 minutos e que a temperatura junto do filme de borracha atinja pelo menos 80 °C. Esta temperatura pode ser medida através de etiquetas termossensíveis² colocadas no interior dos componentes, como mostra a Figura 4.4. Os dados obtidos para os fornos das linhas de fundos e de cúpulas apresentam-se na Tabela 4.1.



Figura 4.4: Etiquetas termossensíveis colocadas no interior de um fundo.

Tabela 4.1: Temperatura e tempo de permanência nos fornos de fundos e de cúpulas.

	Temperatura (°C)	Tempo (min)
Fundos	50	4,5
Cúpulas	70	1,5

²Estas etiquetas mudam de cor quando a temperatura atinge o valor para o qual estão calibradas.

4.3 Sistema de medição

O procedimento de medição do peso húmido de borracha é o seguinte:

1. Recolher uma amostra de 5 componentes;
2. Colocar a amostra dentro de um saco;
3. Pesar o conjunto amostra e saco na balança mais próxima;
4. Retirar a amostra do saco e aplicar borracha nos componentes;
5. Voltar a colocar a amostra dentro do saco;
6. Pesar o conjunto amostra e saco novamente;
7. Calcular a diferença entre as duas pesagens.

O saco é necessário porque a borracha começa a perder humidade logo após a sua aplicação. A função do saco é reter essa humidade para que a sua massa seja também incluída na pesagem após a aplicação.

Para a medição do peso seco, volta-se a colocar a amostra no mesmo saco após a saída desta do forno e efetua-se nova pesagem. A diferença entre esta e a primeira pesagem é o *peso seco*.

O facto de pesar os 5 componentes em conjunto permite obter facilmente uma média das variáveis de resposta. No entanto, o procedimento de medição não é capaz de avaliar a dispersão das variáveis na amostra. Esta forma de medição justifica-se pela deficiente discriminação das balanças usadas. Estas têm uma discriminação de 10 mg, o que não é suficiente para pesar os componentes individualmente porque as quantidades que se estão a medir são bastante pequenas; por exemplo, no caso dos fundos Ø43, os limites de especificação são 73.58–89.93 mg. Usando uma amostra de 5 componentes, aumenta-se a discriminação da balança para $10/5 = 0.2$ mg.

A falta de sensibilidade à dispersão das variáveis é um problema. É possível quantificar a quantidade de dispersão que é escondida por este método recorrendo ao *teorema do limite central*. Se a população real apresentar um desvio-padrão $\sigma_R = 10$ mg, o desvio-padrão σ_M obtido a partir deste procedimento de medição é igual a $\sigma_R/\sqrt{N} = 10/\sqrt{5} = 4.5$ mg. Este resultado significa que este procedimento de medição “esconde” efetivamente cerca de metade da variação real do processo.

A fim de diagnosticar a precisão do sistema de medição, efetuou-se um estudo *Gauge R&R* curto, tal como descrito em 2.3.2. Este foi realizado apenas com amostras sem borracha. É razoável assumir que os resultados seriam idênticos se as amostras contivessem borracha. Se assumirmos que a segunda pesagem (amostras com borracha) apresentaria uma variação igual, podemos estimar a variação da medição do peso húmido, que implica duas pesagens. A variância de uma variável aleatória obtida através de uma adição de duas variáveis aleatórias é dada pela equação 4.2. Se assumirmos que essas duas variáveis são independentes, como é o caso, podemos eliminar o termo referente à covariância e chegar à equação 4.3.

$$V(y_1 + y_2) = V(y_1) + V(y_2) + 2\text{Cov}(y_1, y_2) \quad (4.2)$$

$$V(y_1 \pm y_2) = V(y_1) + V(y_2) \quad (4.3)$$

A Tabela 4.2 mostra os resultados obtidos a partir dos dados do estudo e ainda as variâncias após a transformação pela equação 4.3. A partir das equações 2.23 e 2.24 calcula-se que as perdas de tolerância do sistema de medição são de 1027 %, considerando a tolerância dos fundos Ø43. Isto significa que, para garantir que a imprecisão do sistema de medição não afeta a decisão quanto à conformidade do produto, a tolerância tem de ser 1027 % mais pequena do que a real. Este é, obviamente, um valor extremamente alto e que aponta para graves problemas no sistema de medição.

Tabela 4.2: Resultados do estudo de diagnóstico do sistema de medição.

	σ_O^2 (mg ²)	σ_{PO}^2 (mg ²)	σ_E^2 (mg ²)	σ_M (mg)
Dados do estudo	3583	0	44813	220
Medição de peso húmido	7166	0	89626	311

5 Análise do processo

5.1 Aplicação de vedante

5.1.1 Causas de variação no peso húmido

De forma a compreender a razão da elevada quantidade de componentes com peso húmido fora das especificações, elaborou-se a partir do conhecimento dos operadores e técnicos, o diagrama de causa-efeito apresentado na Figura 5.1. As causas apontadas são, na sua grande maioria, relacionadas com o equipamento, o que é natural porque o processo é altamente automatizado. A única causa atribuída ao material do processo é a variação na viscosidade da borracha.

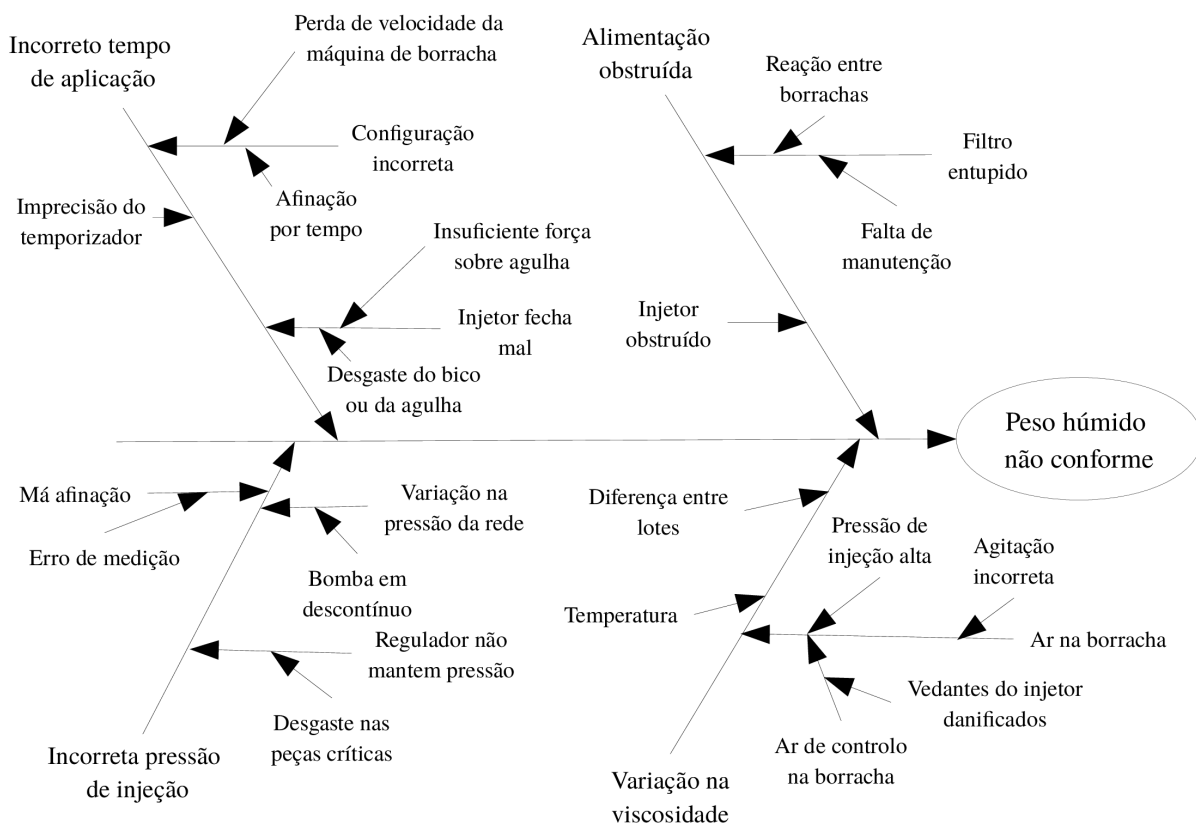


Figura 5.1: Diagrama de causa-efeito para o defeito peso húmido não conforme.

Fazendo uma análise mais profunda às causas raiz de todas as causas na Figura 5.1, pode-se argumentar que elas são essencialmente duas: um plano de manutenção preventiva pouco eficaz e um controlo de processo deficiente que não é capaz de detetar variações significativas e potencia o *tampering* do processo.

Para comprovar algumas das causas levantadas durante o processo de construção do diagrama de causa-efeito, conduziram-se algumas experiências que se descrevem nas secções seguintes.

5.1.2 Tempo de aplicação

Nestas experiências foi aplicado vedante em 30 componentes de forma consecutiva e cada um deles foi pesado de forma a obter um valor de peso húmido. A dispersão dos resultados em cada linha, medida pelo desvio-padrão observado, é apresentada na Tabela 5.1. Mais uma vez, a variável usada é o desvio percentual em relação ao nominal.

Tabela 5.1: Variação do processo de aplicação nas várias linhas. As letras *D* e *E* indicam o lado direito ou esquerdo da linha.

Linha	Desvio padrão percentual
15E	11.54
15D	11.35
68E	10.36
3E	7.76
68D	7.44
3D	6.48
90	3.64
39	3.40
69E	3.14
55D	2.41
55E	2.41
69D	2.34
17E	2.24
62	2.18
38	1.97
52	1.67
17D	1.63
37	1.55
67	1.23

As seis linhas com maior variação são aquelas em que o tempo de aplicação é controlado por um autómato de uso geral em vez de um temporizador dedicado. Pode-se concluir, portanto, que estes autómatos não possuem a precisão suficiente para controlar o tempo de aplicação de forma eficaz.

É interessante também notar que a maioria das linhas com menor variação usam injetores de controlo eletrónico por solenóide em vez de injetores de controlo pneumático. Este é o caso das linhas 67, 37, 17 e 38.

5.1.3 Pressão de entrada no regulador

A central de distribuição de borracha é responsável por garantir o fornecimento de borracha a todas as linhas da Estampagem de Aerossóis. Para tal, a pressão na rede é mantida entre os 4 e os 5 bar. A bomba usada para garantir esta pressão tem uma capacidade muito superior, e por

isso, apenas é ativada quando a pressão chega aos 4 bar. Nesse momento, a pressão da rede sobe repentinamente para perto dos 5 bar.

Os reguladores usados nas linhas são de uma etapa e uma característica deste tipo de reguladores é que a sua pressão de saída depende da pressão de entrada para uma mesma configuração da força no diafragma. Ora, uma vez que a pressão de entrada varia, também a pressão de saída irá variar, afetando a quantidade de borracha aplicada.

A Figura 5.2 mostra o peso húmido de quatro amostras de 4 fundos cada retiradas da linha 69 (a mais próxima da central) com um intervalo de cerca de um minuto entre cada uma. O pico na 2ª amostra é bastante óbvio.

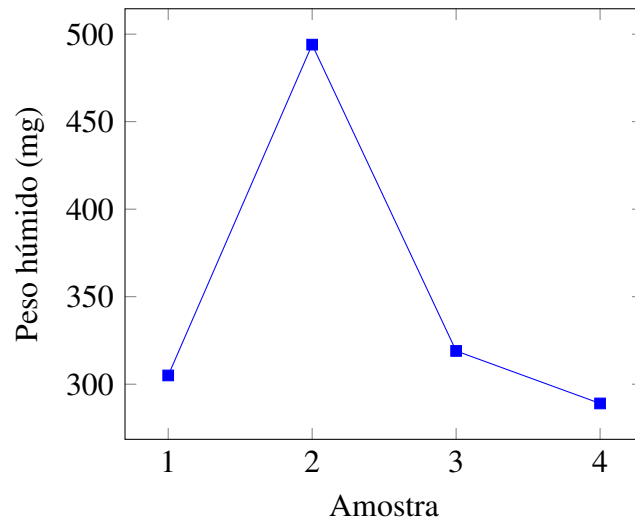


Figura 5.2: Variação do peso húmido devido à variação da pressão da rede.

Numa tentativa de provar estatisticamente este fenómeno, conduziu-se uma experiência na linha 17 (a mais afastada da central) em que 32 fundos foram divididos em 8 grupos. Os intervalos de tempo entre aplicação de vedante em cada grupo foram decididos aleatoriamente. Dentro de cada grupo, os componentes passaram na máquina de aplicação de borracha consecutivamente. Os resultados da experiência são representados pelo gráfico na Figura 5.3. O teste de hipóteses apresentado na equação 5.1 permite, através de uma análise de variância, verificar a existência do fenómeno. O teste apresenta um *valor-p* de 0.01, significando que pelo menos uma das amostras difere das outras a um nível de significância $\alpha = 0.01$, podendo ter-se verificado o efeito do pico de pressão da rede.

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_n$$

$$H_1 : \text{pelo menos um } \mu_i \text{ é diferente} \quad (5.1)$$

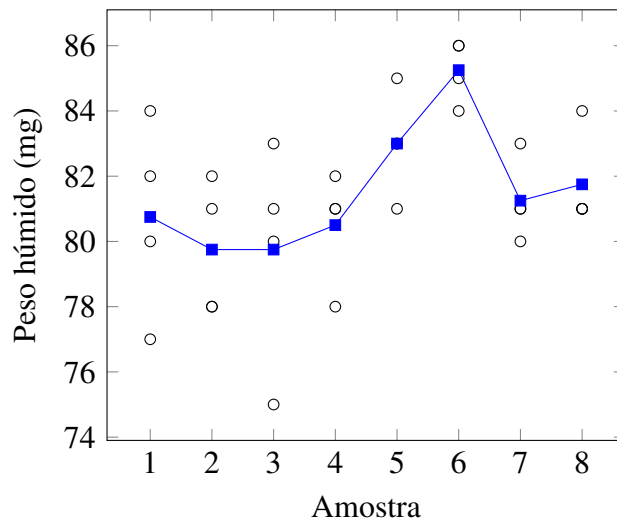


Figura 5.3: Resultados da experiência para testar efeito da pressão de entrada no regulador.

5.1.4 Viscosidade do vedante

A viscosidade da borracha terá um efeito no caudal que pode ser modelado pela lei de Hagen-Poiseuille (eq. 5.2) (Munson et al. 2009, 315). Como se pode ver, o caudal será tanto maior quanto menor for a viscosidade do fluido.

$$Q = \frac{\Delta P \pi r^4}{8 \mu L} \quad (5.2)$$

ΔP perda de pressão

μ viscosidade dinâmica do fluido

L comprimento do tubo

Q caudal volumétrico de fluido

r raio do tubo

Para entender as variações presentes na viscosidade da borracha, oito amostras do depósito da central foram retiradas em diferentes dias. A viscosidade foi medida com um viscosímetro de cilindro rotativo e foi comparada com a temperatura da amostra, como mostra a Figura 5.4. Como se pode observar, não parece ser possível prever a viscosidade da borracha a partir da sua temperatura, apesar de haver uma correlação conhecida entre a temperatura e a viscosidade de um fluido (Seeton 2006). Isto porque a diferença na viscosidade entre lotes será maior do que aquela produzida pelas variações de temperatura.

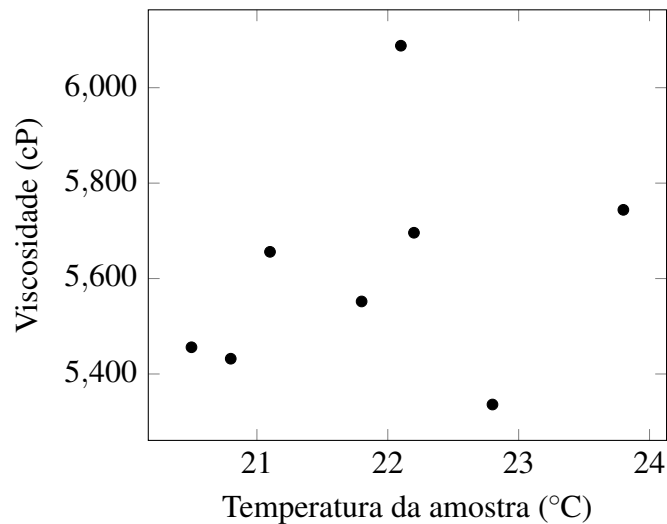


Figura 5.4: Diagrama de dispersão da temperatura da amostra de borracha e sua viscosidade.

5.2 Secagem

5.2.1 Correlação com o peso húmido

É natural que se ponha a hipótese de que quanto mais quantidade de vedante estiver presente no filme, mais dificuldade terão os fornos em secar a borracha. A Figura 5.5 mostra um diagrama de dispersão que relaciona as duas variáveis em causa: peso húmido e humidade residual. Este diagrama foi construído a partir de amostras de uma linha recolhidas ao longo de vários dias.

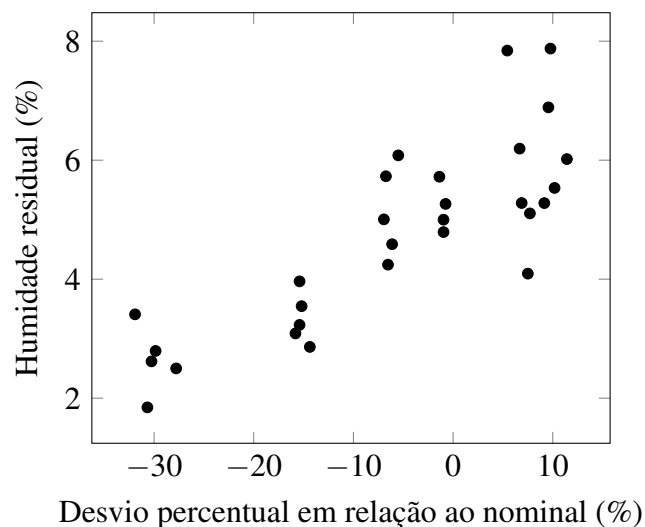


Figura 5.5: Diagrama de dispersão do peso húmido e da humidade residual.

A dependência das duas variáveis pode ser medida através do seu coeficiente de correlação, que neste caso toma o valor de 0.82, confirmando a hipótese colocada.

5.2.2 Fatores significativos

Para compreender os fatores que mais influenciam o processo de secagem, foi desenhada uma experiência completamente fatorial envolvendo três fatores com dois níveis cada: temperatura da resistência do forno, tempo no forno e espaçamento entre componentes. A experiência foi executada numa linha de fundos porque é nestes que o defeito da borracha fora da cravação é mais frequente. A linha em questão usa fornos de injeção de ar quente. O plano detalhado desta experiência, elaborado segundo as recomendações de Coleman e Montgomery (1993), pode ser consultado no Anexo A.

Após uma análise de variância aos dados recolhidos, obtiveram-se os resultados apresentados na Tabela 5.2. A um nível de confiança de 99 %, os efeitos significativos são os efeitos principais da temperatura e do espaçamento entre componentes e ainda a interação entre eles.

Tabela 5.2: Resultados das experiências—tabela ANOVA.

Fonte de variação	Graus de liberdade	Quadrado médio	F_0	Valor p
Temperatura (T)	1	0.00439	110.2	0.0090
Erro <i>whole-plot</i>	2	0.00004		
Tempo (t)	1	0.00025	3.579	0.1074
Espaçamento (E)	1	0.03285	473.963	6.13×10^{-7}
$T \times t$	1	0.00003	0.398	0.5515
$T \times E$	1	0.00238	34.288	0.0011
$t \times E$	1	0.00020	2.930	0.1378
$T \times t \times E$	1	0.00002	0.261	0.6279
Erro <i>sub-plot</i>	6	0.00007		

A Figura 5.6 mostra os efeitos principais dos três fatores e a Figura 5.7 mostra a interação entre a temperatura e o espaçamento.

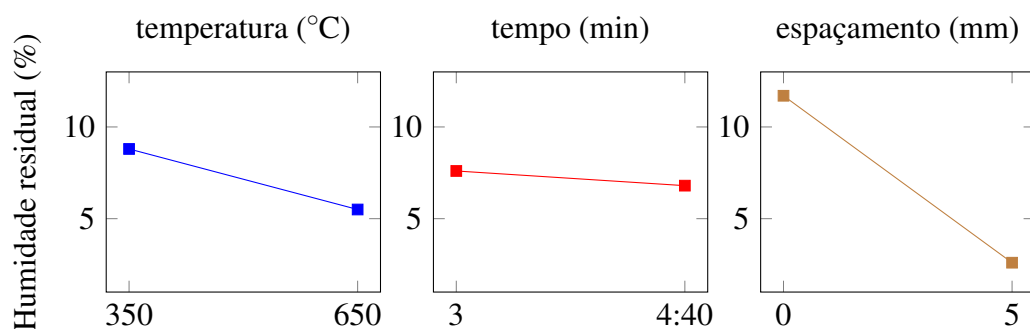


Figura 5.6: Efeitos principais dos fatores na humidade residual.

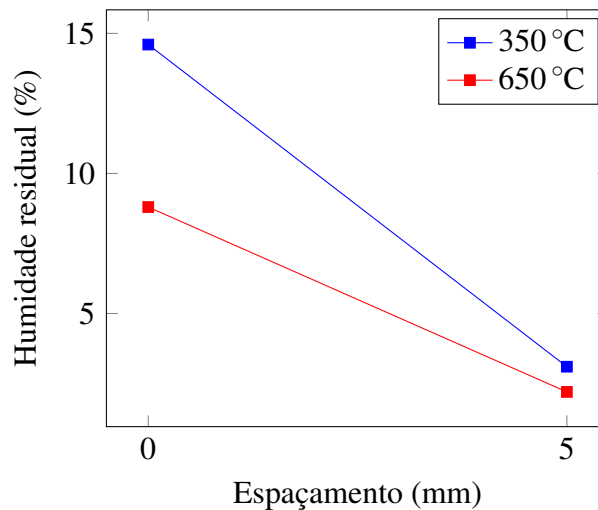


Figura 5.7: Interação entre a temperatura e o espaçamento.

A partir dos resultados apresentados pode-se concluir que o espaçamento entre fundos tem de facto um efeito muito significativo na variável de resposta. Ignorando outros fatores, os fundos espaçados apresentam em média uma humidade residual de 2.6 % contra os 11.7 % dos fundos não espaçados.

Na interação entre a temperatura e o espaçamento, observa-se que a diminuição da humidade residual com o espaçamento a temperaturas mais baixas é mais drástica do que a diminuição observada a temperaturas altas, apesar de estas produzirem, ainda assim, melhores resultados. Este efeito poderá resultar do problema introduzido na secção A.1.2 sobre a formação de uma crosta no filme de borracha. De facto, foi possível observar a formação de bolhas nas experiências com fundos espaçados e temperaturas altas. Será importante estudar a temperatura máxima a que se pode submeter os fundos espaçados sem que ocorra formação de bolhas. Poderá ser também frutífero fazer experiências com uma configuração diferente do forno em que a temperatura mais alta se situe no fim do forno em vez de no princípio. Essa configuração permitirá um aquecimento mais gradual do filme de borracha, o que poderá contribuir para a não formação de bolhas.

Resta ainda notar que o facto de o tempo de passagem no forno não ter mostrado efeito significativo na variável de resposta se poder ficar a dever ao intervalo demasiado curto entre os níveis testados. Dos resultados obtidos pode-se deduzir que pelo menos o último minuto e meio no forno não é eficaz na eliminação de humidade residual. Isto pode-se dever à deficiente distribuição de temperatura no interior do forno.

5.2.3 Espaçamento apropriado entre fundos

Para que seja desenhada uma solução que permita espaçar os fundos dentro do forno, é importante saber qual o espaçamento ótimo entre os componentes. Para responder a esta questão, foi desenhada uma experiência do tipo *RSM* que permitisse construir um modelo linear. Nesta experiência, investigou-se o efeito dos dois fatores significativos encontrados em 5.2.2: temperatura e espaçamento. A configuração da experiência é representada pela Figura 5.8. Foram usados quatro pontos centrais.

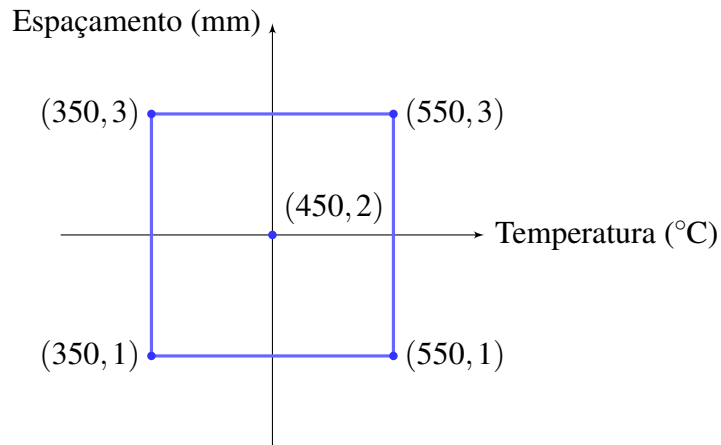


Figura 5.8: Configuração da primeira experiência *RSM* para otimização da temperatura e espaçamento.

No planejamento desta experiência também se teve em conta que a velocidade de passagem no forno e, conseqüentemente, o seu tempo de permanência depende do espaçamento entre os componentes. Mantendo-se a cadência da linha, o tempo no forno será tão menor quanto maior for o espaçamento. Esta relação pode ser deduzida a partir da Lei de Little, chegando-se à equação 5.3. Para cada valor de espaçamento testado, a velocidade de passagem no forno correspondente foi simulada.

$$t = \frac{L}{(h + E)C} \quad (5.3)$$

t tempo no forno

L comprimento do forno

h altura do componente

E espaçamento entre componentes

C cadência da linha

Os resultados da experiência estão resumidos na Tabela 5.3 e na Figura 5.9. O ajuste do modelo na Tabela 5.3 é o resultado de um teste ANOVA que compara os valores previstos pelo modelo com os seus resíduos. Quanto menor for o *valor-p*, melhor é o ajuste.

Tabela 5.3: Resultados da experiência de otimização de temperatura e espaçamento.

Fator	Efeito estimado	t_0	Valor p
Interceção	12.0	20.1	5.6×10^{-6}
Temperatura	-0.015	-2.6	0.05
Espaçamento	1.5	2.6	0.05
Ajuste do modelo			0.04

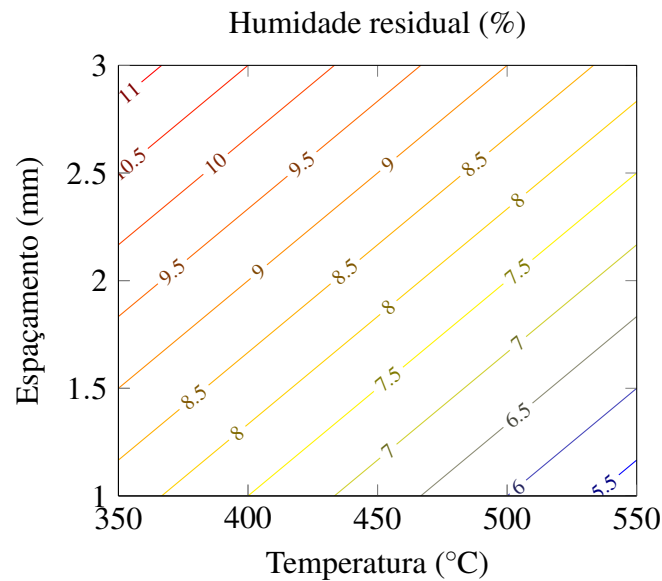


Figura 5.9: Gráfico de contornos do modelo resultante da experiência de otimização de temperatura e espaçamento.

Os resultados mostram que a umidade residual aumenta com o espaçamento, o que é um resultado pouco esperado. Isto deve-se ao efeito da velocidade de passagem no forno, que será significativo na capacidade deste de eliminar a umidade residual da borracha. O efeito da temperatura é o esperado.

Uma vez que um espaçamento menor que 1 mm não é praticável, realizou-se uma nova experiência com temperaturas mais altas e os mesmos espaçamentos, tal como mostra a Figura 5.10. No entanto, a temperaturas superiores a 550 °C começou a observar-se a formação de bolhas.

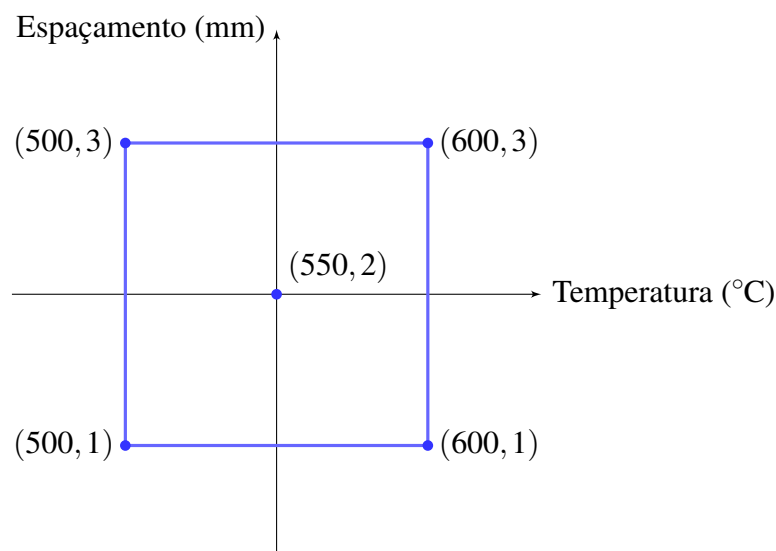


Figura 5.10: Configuração da segunda experiência *RSM* para otimização da temperatura e espaçamento.

Sendo assim, pode-se afirmar que um espaçamento de 1 mm entre fundos e uma temperatura da resistência do forno de 550 °C constituíram a configuração ideal para eliminação da humidade do filme de borracha. Com este espaçamento, os fundos permanecem no forno durante 3 minutos e 9 segundos (eq. 5.4).

$$t = \frac{L}{(h+E)C} = \frac{1300 \text{ mm}}{(2.1 \text{ mm} + 1 \text{ mm}) \times 133 \text{ un./min}} = 3.15 \text{ minutos} \quad (5.4)$$

5.2.4 Arrefecimento à saída do forno

Um outro fator que pode influenciar a humidade residual do filme de borracha é o arrefecimento do componente à saída do forno. Algumas linhas possuem pequenos arrefecedores nesta posição que são responsáveis por aumentar a movimentação de ar junto do filme de borracha promovendo assim a evaporação da água.

Realizou-se uma pequena experiência para testar o efeito desta ventilação, relacionando a variável de resposta *humidade residual* com o tempo de arrefecimento com fundos espaçados, como mostra a Figura 5.11. A experiência foi constituída por três níveis (0, 1 e 2 minutos) e duas réplicas com 5 observações em cada tratamento.

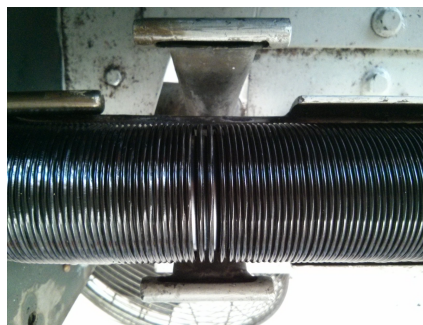


Figura 5.11: Fundos espaçados junto dos arrefecedores à saída do forno.

Os resultados apresentados na Figura 5.12 mostram que a diminuição é drástica do primeiro para o segundo nível, atenuando-se significativamente do segundo para o terceiro.

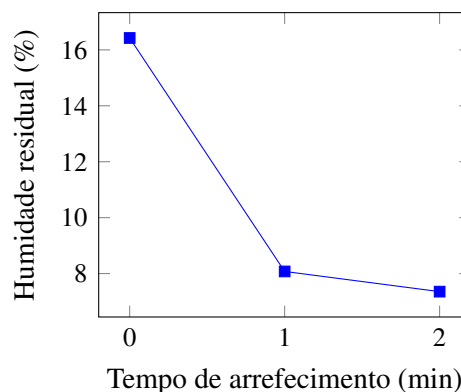


Figura 5.12: Efeito do tempo de arrefecimento na humidade residual da borracha.

5.2.5 Efeito dos fatores ambientais

Uma das hipóteses que se coloca quanto ao efeito dos fatores ambientais na humidade residual da borracha é a sua proporcionalidade direta em relação à humidade relativa do ar. Uma outra hipótese afirma a proporcionalidade inversa entre a variável de resposta e a temperatura do ar.

O registo destes dois fatores ambientais foi iniciado simultaneamente com o novo controlo do processo pelos operadores. A Figura 5.13 apresenta diagramas de dispersão que relacionam a temperatura e humidade relativa com a humidade residual. Como se pode ver, nenhum dos fatores ambientais consegue prever o valor da humidade residual, sendo os coeficientes de correlação muito próximos de 0. A hipótese sobre os efeitos destes fatores ambiente pode ser verdadeira. No entanto, há demasiada variação nas observações que “esconde” essa relação.

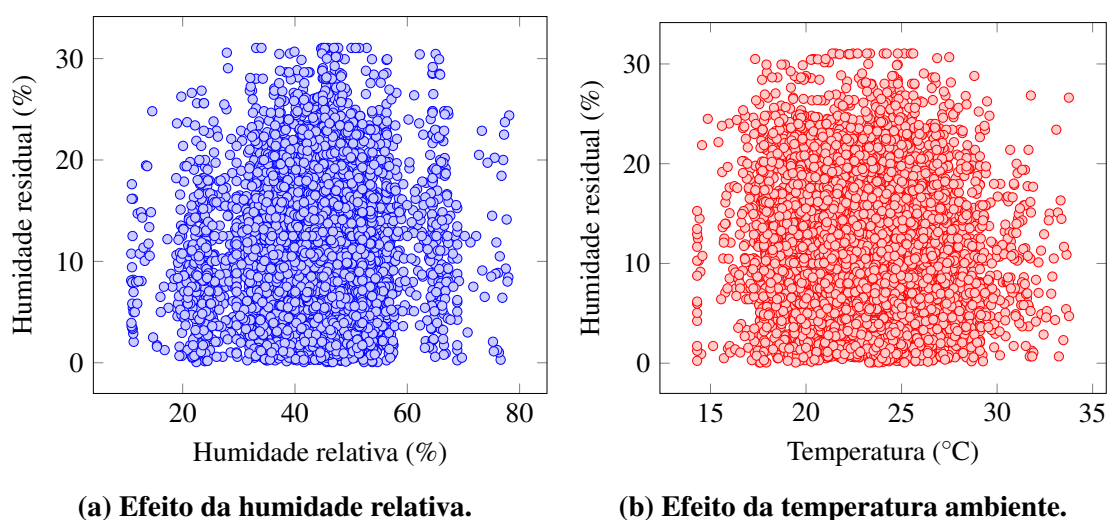


Figura 5.13: Efeito de fatores ambientais na humidade residual da borracha.

5.3 Sistema de medição

A grande maioria da variação observada no sistema de medição é efeito da incorreta utilização do saco. Alguns operadores nem sempre colocam todo o saco sobre o prato da balança, como mostra a Figura 5.14a. Após a introdução do uso de um copo onde a amostra e o saco teriam que ser inseridos, como mostra a Figura 5.14b, as perdas de tolerância do sistema de medição baixaram para 30 %.



(a) Saco fora do prato da balança.



(b) Utilização de um copo de plástico.

Figura 5.14: Erro na medição e sua solução.

Mas ainda assim, a balança apresentava demasiada instabilidade, introduzindo erros na medição. Após a recolha do conhecimento de técnicos e operadores, chegou-se à conclusão que essa instabilidade era devida às movimentações do ar sobre a balança. Assim, após a introdução de uma proteção (Figura 5.15), as perdas de tolerância baixaram para o nível aceitável de 10 %.

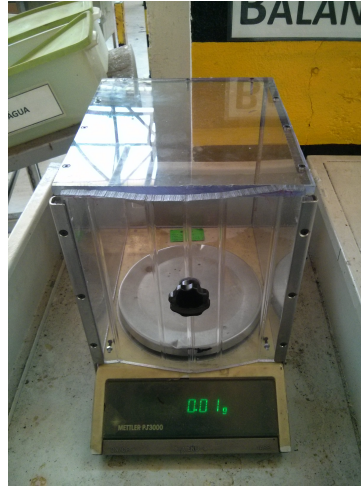


Figura 5.15: Proteção da balança contra as movimentações de ar desestabilizadoras.

Apesar das perdas de tolerância terem atingido um nível aceitável com estas melhorias, é necessário entender que estas foram calculadas tendo em conta o atual procedimento de medição que usa uma amostra de cinco componentes. Caso se queira pesar cada componente individualmente a tolerância será cinco vezes menor e, por isso, este sistema de medição teria perdas de tolerância de 50 %.

6 Soluções propostas

Apresentam-se de seguida algumas soluções aos diferentes problemas encontrados durante o projeto. Estas foram elaboradas juntamente com os engenheiros, técnicos e operadores conhecedores do processo. A eficácia de uma parte destas soluções foi já comprovada por experiências realizadas durante o projeto, enquanto a outra parte necessita de mais estudo.

6.1 Aplicação de vedante

Temporizadores precisos O uso de temporizadores mais precisos é essencial na minimização da variação do peso húmido. Usando um antigo temporizador dedicado na linha 68D como solução temporária, conseguiu-se passar de um desvio padrão percentual de 10.36 % para 2.3 %.

Injetores eletrónicos Os injetores de controlo eletrónico têm uma melhor performance do que os de controlo pneumático, como mostram os resultados da Tabela 5.1. Além disso, o seu desenho é mais simples e a manutenção mais fácil.

Restaurar reguladores à sua condição básica O desgaste em peças críticas do regulador (Anexo B), como a esfera (peça 20), a anilha (peça 16) ou o diafragma (peça 22) resulta em variações de pressão à saída do regulador. Atualmente, utilizam-se esferas de aço de construção não recomendadas pelo fornecedor ao invés das esferas de carboneto de tungsténio que são usadas nos regulares na sua condição básica. Estas esferas têm uma resistência ao desgaste e à corrosão muito menor e introduzem grandes variações no peso húmido.

Reguladores de duas etapas Para garantir a estabilidade da pressão de injeção, devem-se considerar reguladores de pressão de duas etapas. Estes reguladores funcionam reduzindo a pressão numa primeira etapa a partir de um diafragma com força fixa. Na segunda etapa, a força do diafragma é ajustável, permitindo a regulação da pressão. Estes reguladores são muito menos sensíveis à pressão de entrada (Beswick 2014).

Controlo de viscosidade É importante encontrar formas de controlar a viscosidade do vedante e garantir a sua estabilidade. É necessário trabalhar em conjunto com o fornecedor do vedante para chegar a uma solução. Uma hipótese seria um sistema de controlo e ajuste contínuo, usando um viscosímetro em linha ligado a um autómato que controla a adição de aditivos reológicos ao vedante, consoante a necessidade de baixar ou aumentar a viscosidade do fluido.

6.2 Secagem

6.2.1 Medidas temporárias

É importante implementar medidas temporárias que evitem o aparecimento da borracha fora da cravação. Propõem-se duas medidas deste cariz.

Validação do lote Criar um sistema que permita estimar a humidade residual do lote no momento imediatamente antes da cravação. Isto permitiria prever o aparecimento do defeito na altura da cravação e daria mais informação às operações de planeamento que poderiam ajustar o agendamento em função desta.

Dupla passagem no forno Nos casos em que a linha de montagem está com falta de material e o período de quarentena de 48 h não é cumprido, uma solução será passar os componentes pelo forno duas vezes. Esta solução implica a redução da cadência da linha para metade mas a sua adoção resultaria numa redução do *lead time* porque as operações de manuseamento, inspeção e retrabalho associadas ao defeito de borracha fora da cravação seriam evitadas.

6.2.2 Espaçadores magnéticos

É possível fazer alterações aos fornos já existentes para provocar um espaçamento entre fundos. Essas alterações passariam pela incorporação de ímanes que provocassem um afastamento entre fundos pela criação de um campo magnético entre eles. Estes espaçadores magnéticos são já usados em várias linhas para amortecer a queda dos componentes no pulmão de alimentação da máquina de borracha, como mostra a Figura 6.1.

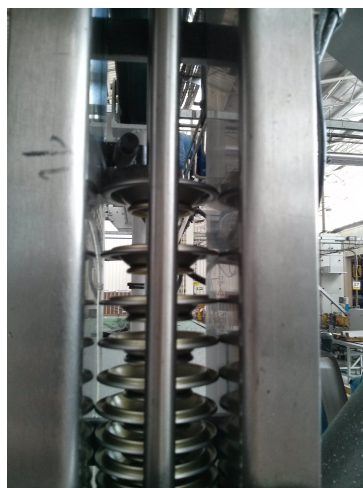


Figura 6.1: Flutuador magnético para amortecimento da queda das cúpulas.

Esta solução pode também ser empregada à saída do forno, juntamente com um sistema de ventilação que permita chegar à redução de humidade residual prevista pelos resultados da experiência descrita em 5.2.4.

6.3 Sistema de medição

A solução para os problemas do sistema de medição foi já apresentada na secção 5.3. É necessário adotar estas melhorias definitivamente. O saco talvez não seja a melhor solução para a retenção da humidade evaporada, podendo existir soluções de uso mais simples e menos sujeitas a erros por parte dos operadores.

Apesar das melhorias fazerem uma grande diferença, o sistema de medição não é ainda assim capaz o suficiente para medir componentes individualmente. Para tal, é necessária a aquisição de balanças com pelo menos 1 mg de discriminação.

6.4 Controlo do processo

A forma como o processo é controlado é extremamente deficiente porque não é capaz de detetar variações, visto que utiliza apenas uma amostra, e encoraja o *tampering* do processo, produzindo ainda mais variação do que aquela que ocorre naturalmente.

A solução é usar cartas de controlo \bar{X} e R para o controlo do peso húmido. O uso destas cartas permitirá distinguir as causas de variação especiais das normais e estabelecerá a estabilidade do processo. No entanto, no estado atual do processo, as cartas de controlo acusariam continuamente variação especial. Assim sendo, é importante eliminar as causas de variação já detetadas.

Este controlo estatístico será importante na elaboração de um plano de manutenção preventiva eficaz porque tornaria mais fácil identificar recorrências de uma variação significativa causada pela falha de um certo componente do sistema de aplicação de vedante. A frequência destas falhas seria usada para calcular o tempo de uso de um componente e substituí-lo antes da sua falha.

7 Conclusão

O trabalho realizado neste projeto pode ser considerado uma primeira abordagem ao processo de aplicação de vedante que a Empresa assumiu, recentemente, como problema crítico. Os problemas descobertos e analisados devem servir como ponto de partida para uma nova abordagem ou reengenharia do processo alvo.

A qualidade na aplicação da borracha vedante tem sido desprezada porque os métodos de controlo proporcionam um *feedback* lento e porque a inspeção final não é possível. Constatou-se que para efetuar uma medição de peso húmido era necessário recolher uma amostra, colocá-la dentro de um saco, transportá-la e colocá-la na balança, pesar a amostra, voltar à linha, colocar a amostra no pulmão de alimentação da máquina da borracha, esperar que seja aplicada borracha na amostra, recolher a amostra antes da entrada no forno (operação que nem sempre é fácil e segura em algumas linhas), colocar a amostra dentro do saco, transportá-la e colocá-la na balança, pesar novamente a amostra e calcular a diferença entre as duas pesagens. Este procedimento leva entre 5 a 10 minutos, o que é muito quando comparado com o *feedback* quase instantâneo da medição de uma dimensão com paquímetro, por exemplo. Depois de produzido o componente não é possível inspecionar os valores de peso húmido ou humidade residual porque para tal são necessárias pesagens antes da aplicação de vedante. Do exposto se conclui que a grande quantidade de defeitos produzidos não é observada.

Num processo em que a inspeção final é impossível, é imperativo que o processo seja estável para que se possa garantir a qualidade do produto. Sendo assim, é absolutamente essencial que as técnicas de controlo estatístico de processos, em especial as cartas de controlo, sejam implementadas na operação de aplicação de vedante. No entanto, o seu uso implica uma formação eficaz e depende essencialmente do compromisso da gestão de topo (Antony e Taner 2003; Rungasamy, Antony e Ghosh 2002). O simples registo de observações numa carta de controlo não é garantia de qualidade pois é necessário haver sistemas de apoio que garantam que os problemas detetados são enfrentados e solucionados.

7.1 Trabalhos futuros

Os trabalhos futuros passam pelo estudo e implementação das propostas apresentadas na secção 6. Além dessas, apresentam-se aqui outras vias de estudo futuro.

7.1.1 Armazenamento de componentes e seu efeito na humidade residual

A forma como os componentes são armazenados para posterior entrega nas linhas de montagem tem efeito na humidade residual da borracha. Segundo alguns estudos preliminares, efetuados pela Empresa, os fundos que são armazenados no fundo do contentor perdem menos humidade ao longo do período de quarentena.

Por outro lado, o facto de os componentes serem armazenados em posição horizontal provoca uma acumulação de vedante do lado de baixo do componente, sempre que a humidade residual à saída da linha seja tão alta que o vedante se comporte ainda como um fluido. O aparecimento de vedante fora da cravação apenas de um lado em algumas embalagens parece confirmar essa hipótese. No entanto, é preciso ter em conta que há outros fatores no processo produtivo que

podem provocar a acumulação de vedante, nomeadamente um pequeno choque logo após a aplicação do vedante e à entrada do forno e a posição horizontal do componente durante a passagem no forno.

Um estudo que permita verificar as causas da dificuldade de evaporação de água nas camadas mais baixas do contentor e possa comprovar o efeito da posição horizontal pode levar a melhorias significativas nesta área.

7.1.2 Melhoria do feedback dos procedimentos de medição

Uma redução do tempo de *feedback* traria benefício na facilidade do controlo do processo, permitindo libertar os operadores para outras tarefas.

Uma forma de reduzir este tempo na medição do peso húmido seria usar um componente *standard* pesado apenas no início da sua entrada em funcionamento. A única pesagem necessária para obter um valor do peso húmido seria então aquela depois da aplicação da borracha. Este teria depois que ser removido por uma operação adicional, por exemplo, mergulho num solvente, que preparasse o componente para uma nova medição.

Na medição da humidade residual, a Empresa conseguiu desenvolver um método bastante mais expedito de estimar a humidade residual. No entanto, este implica ainda três pesagens. É conhecido que a humidade residual está correlacionada negativamente com a aderência do filme de borracha ao componente. Um procedimento que permitisse quantificar esta aderência poderia fazer com que esta substituísse a humidade residual como variável de resposta do processo. Existem soluções no mercado para determinação rápida de humidade residual em amostras sólidas por determinação da velocidade de perda de massa por evaporação ou por titulação Karl-Fischer. No entanto, é necessário averiguar se estas soluções admitem a amostra de configuração algo anormal do filme de vedante num componente.

7.1.3 Validação dos limites de especificação

Peso húmido Os limites de especificação atuais para o peso húmido são os recomendados pelo fornecedor. Embora seja difícil determinar a quantidade de componentes não conforme, por defeito de peso húmido, que são cravados é razoável admitir que é grande, tendo em conta a instabilidade do processo. Se a função do vedante é impedir fugas, deve-se admitir que, se a quantidade aplicada não for conforme, a embalagem final muito provavelmente terá fugas. No entanto, a quantidade de fugas detetadas automaticamente nas linhas de montagem é de ordem inferior aos componentes com defeito. Sendo assim, será importante rever os limites de especificação para garantir que estes não são demasiado apertados.

Humidade residual A mesma situação se passa com a especificação para a humidade residual. Como se pôde verificar, apenas uma pequena quantidade dos componentes cumpre este requisito. Mais uma vez, a quantidade de defeitos de borracha fora da cravação não coincide com a quantidade de componentes com humidade residual acima do limite. Será também importante averiguar com rigor qual o valor máximo desta variável que garanta o não aparecimento do defeito após cravação.

Referências

- Antony, Jiju, e Tolga Taner. 2003. “A conceptual framework for the effective implementation of statistical process control”. *Business Process Management Journal* 9 (4): 473–489.
- Automotive Industry Action Group. 2002. *Measurement system analysis*. Detroit, MI: AIAG.
- Beswick Engineering. 2014. “The basics of pressure regulators”. Acedido em 19/06/2014. <http://www.beswick.com/basics-pressure-regulators>.
- Burdick, Richard K., Connie M. Borror e Douglas C. Montgomery. 2005. *Design and analysis of gauge R&R studies: Making decisions with confidence intervals in random and mixed ANOVA models*. SIAM.
- Coleman, David E., e Douglas C. Montgomery. 1993. “A Systematic Approach to Planning for a Designed Industrial Experiment”. *Technometrics* 35 (1): 1–12.
- Colep. 2014. “About us”. Acedido em 19/06/2014. www.colep.com/about-us.
- . 2013. *Consolidated annual report and financial statements*. Acedido em 19/06/2014. www.colep.com/upload/files/549/1401264089.pdf.
- Deming, William Edwards. 2000. *The new economics: for industry, government, education*. MIT press.
- George, Michael L., David Rowlands, Mark Price e John Maxey. 2005. *The lean six sigma pocket toolbox: a quick reference guide to 100 tools for improving quality and speed*. McGraw-Hill.
- Goh, T.N. 2002. “The role of statistical design of experiments in Six Sigma: perspectives of a practitioner”. *Quality Engineering* 14 (4): 659–671.
- Iizarbe, Laura, María Jesús Álvarez, Elisabeth Viles e Martin Tanco. 2008. “Practical applications of design of experiments in the field of engineering: a bibliographical review”. *Quality and Reliability Engineering International* 24 (4): 417–428.
- Ishikawa, Kaoru. 1985. *What is total quality control?: the Japanese way*. Prentice-Hall.
- Liker, Jeffrey. 2006. *The Toyota Way Fieldbook*. Esensi.
- Mason, Ben, e Jiju Antony. 2000. “Statistical process control: an essential ingredient for improving service and manufacturing quality”. *Managing Service Quality* 10 (4): 233–238.
- Montgomery, Douglas C. 2000. *Design and Analysis of Experiments*. 8ª ed. 752. Wiley.
- . 2009. *Introduction to statistical quality control*. John Wiley & Sons.
- Montgomery, Douglas C., e George C. Runger. 2010. *Applied statistics and probability for engineers*. John Wiley & Sons.
- Munson, Bruce R., Donald F. Young, Theodore H. Okiishi e Wade W. Huebsch. 2009. *Fundamentals of fluid mechanics*. Wiley.
- Oakland, John S. 2008. *Statistical Process Control*. Routledge.
- Pyzdek, Thomas, e Paul A. Keller. 2003. *Quality Engineering Handbook*. CRC Press.
- Rungasamy, S., J. Antony e S. Ghosh. 2002. “Critical success factors for SPC implementation in UK small and medium enterprises: Some key findings from a survey”. *TQM Magazine* 14 (4): 217–224.

- Seeton, Christopher J. 2006. “Viscosity-temperature correlation for liquids”. Em *STLE/ASME 2006 International Joint Tribology Conference*, 131–142. American Society of Mechanical Engineers.
- Sokovic, M., D. Pavletic e K. Kern Pipan. 2010. “Quality improvement methodologies–PDCA cycle, RADAR matrix, DMAIC and DFSS”. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering* 43 (1): 476–483.
- Wheeler, Donald J. 2011. “Is the part in spec?” Acedido em 21/05/2014. <http://www.qualitydigest.com/inside/twitter-ed/part-spec.html>.
- . 2010. “Problems with gauge R&R studies”. Acedido em 21/05/2014. <http://www.qualitydigest.com/inside/twitter-ed/problems-gauge-rr-studies.html>.
- Wilson, Lonnie. 2009. *How to implement lean manufacturing*. McGraw Hill Professional.

A Plano da experiência de exploração do processo de secagem

Para conhecer o processo de secagem e os fatores significativos, desenhou-se um conjunto de experiências que permitiram conhecer melhor o processo. Os três fatores em estudo são: temperatura do forno, tempo de passagem no forno e espaçamento entre fundos. Importa também averiguar se existe alguma interação entre estes fatores.

Numa experiência futura, será também importante estudar um quarto fator, o nível de convecção forçada no forno. Devido a limitações orçamentais, não foi possível estudar este fator neste conjunto de experiências.

A.1 Background relevante

Segue-se um pequeno resumo do conhecimento existente acerca do processo e que foi usado no planeamento das experiências.

A.1.1 Relações teóricas entre fatores e variável de resposta

Temperatura um aumento deste fator diminuirá a humidade relativa do ar, aumentando a taxa de evaporação.

Tempo um aumento deste fator permitirá a evaporação de uma quantidade maior de água visto que a taxa de evaporação é finita.

Espaçamento aumentará o fluxo de ar pouco saturado a passar pelo filme de borracha, aumentando assim a taxa de evaporação.

A.1.2 Conhecimento empírico

Uma temperatura excessiva no forno poderá levar à formação de uma crosta superficial no filme de borracha, evitando assim a evaporação da água por baixo dessa crosta.

Os defeitos na cravação provocados pela excessiva humidade residual da borracha são muito mais frequentes nos meses de inverno alegadamente devido à menor temperatura e maior humidade relativa do ambiente.

A.1.3 Experiências passadas

Uma experiência obteve menor humidade residual com o uso de arrefecedores no final da linha. A mesma experiência detetou uma taxa de evaporação mais alta no caso das cúpulas, alegadamente devido à temperatura superior destas antes da aplicação da borracha.

Uma outra experiência detetou reduções drásticas de humidade residual com o espaçamento entre fundos. A mesma experiência mediu médias de humidade residual sem espaçamento até 40 % de humidade residual.

Ainda outra experiência concluiu que existe uma relação linear positiva entre a quantidade de borracha aplicada e a humidade residual. A mesma experiência mediu médias de aproximadamente 5 % de humidade residual.

A.2 Variável de resposta

A.2.1 Operação normal

A humidade residual varia entre 2 % a 40 % dependendo da linha e da altura do ano. Na linha em estudo, a variável de resposta apresenta valores entre aproximadamente 4 % e 18 %.

A.2.2 Sistema de medição e respetiva precisão

O procedimento de medição consiste em:

1. Pesar amostras à saída da linha;
2. Secar amostras numa estufa a 120 °C durante 20 minutos;
3. Pesar novamente as amostras;
4. Calcular a diminuição percentual de massa (eq. A.1).

$$H_R = \frac{m_{BS} - m_S}{m_{BS} - m_{SB}} = \frac{m_{BS} - m_S}{P_S} \quad (\text{A.1})$$

m_{BS} massa da amostra com borracha seca à saída da linha.

m_S massa da amostra após a secagem total na estufa.

P_S peso seco—massa de borracha na amostra após a secagem no forno da linha.

Não se conhece a precisão do método mas acredita-se que se pode confiar numa precisão de pelo menos 0.1 %.

A.3 Variáveis de controlo

As variáveis de controlo são aquelas correspondentes aos fatores em estudo. A Tabela A.1 detalha cada uma das variáveis em função do seu valor na operação normal do processo, da precisão da configuração da variável, das configurações propostas para esta experiência e do efeito previsto na variável de resposta.

Note-se que a variável *temperatura do forno* é a temperatura da resistência que aquece o ar a ser injetado no forno. Esta é muito mais alta do que a real temperatura dentro do forno.

Tabela A.1: Variáveis de controlo da experiência.

Variável	Operação normal	Precisão de configuração	Configurações propostas	Efeito previsto
Temperatura do forno	650 °C	50 °C	350, 650 °C	↘
Tempo	4:40 min	10 s	3, 4:40 min	↘
Espaçamento	0 mm	5 mm	0, 5 mm	↘

A.4 Fatores a manter constantes

Estes fatores são aqueles cuja influência sobre a variável de resposta é conhecida mas que estão fora do âmbito de estudo nesta experiência. As variáveis associadas devem ser mantidas constantes durante todas as experiências conduzidas. A Tabela A.2 detalha estes fatores.

Tabela A.2: Fatores a manter constantes.

Variável	Nível	Variação	Medição (pre-cisão)	Controlo	Efeito
Quantidade de borracha	nominal	5 % de desvio	Peso húmido (1 mg)	Pressão de injeção	↗

A afinação do peso húmido do filme de borracha foi feita antes do início do conjunto de experiências. A média do peso húmido registado antes do início das experiências foi de 100 mg por fundo. O nominal para este diâmetro, Ø47, é de 96.93 mg por fundo.

Verificou-se também a partir da medição individual de 10 fundos que a variação se encontrava dentro de limites aceitáveis. Os 10 fundos apresentaram um desvio-padrão de 1.8 %.

A.5 Fatores ruído

Estes são os fatores que influenciam a variável de resposta mas que não são facilmente controláveis. Para mitigar a sua influência é necessário delinear uma estratégia.

A Tabela A.3 detalha as variáveis ruído nesta experiência. A mitigação foi conseguida pela realização da experiência num período de tempo relativamente curto (cerca de 3 horas) em que estas variáveis permanecem aproximadamente fixas. As diferenças que possam existir durante o decurso da experiência serão absorvidas pela aleatoriedade da sequência dos tratamentos.

Tabela A.3: Fatores ruído.

Variável	Precisão de medição	Efeito
Temperatura ambiente	0.1 °C	↘
Humidade relativa	0.1 %	↗
Teor sólidos da borracha	0.1 %	↘

As experiências foram realizadas a uma temperatura de aproximadamente 27 °C e a uma humidade residual de 39.5 %. O teor de sólidos da borracha não foi medido mas não foi acrescentada nenhuma borracha ao depósito da central da borracha durante o decurso das experiências pelo que se pode admitir que este fator ruído terá permanecido constante.

A.6 Interações

Existe uma interação entre duas variáveis de controlo se, por exemplo, o aumento das duas variáveis resulta num aumento maior da variável de resposta do que aquele que se previria pela simples adição dos efeitos de cada uma das variáveis de controlo. As interações que se prevêm nesta experiência são as seguintes:

- Temperatura e tempo;
- Temperatura e espaçamento.

A.7 Restrições

A principal restrição neste conjunto de experiências são os cerca de 10 minutos que o forno demora a atingir a nova temperatura desejada. Este facto deve ser considerado no planeamento das experiências.

Para conseguir o espaçamento entre fundos é necessário introduzir o espaçador após a aplicação de borracha. Este procedimento tem de ocorrer o mais rapidamente possível para que haja pouca perda de humidade entre a aplicação e a entrada no forno. Para mitigar o efeito deste tempo adicional entre a aplicação e a passagem no forno, os fundos que não foram submetidos a espaçamento aguardaram 30 s entre as duas operações do processo.

A.8 Desenho da experiência

Sendo o número de variáveis de controlo baixo, um *design* completamente fatorial é o mais acertado. É assim possível investigar todos os efeitos principais e todas as interações de primeira e segunda ordem.

A dificuldade na mudança de temperatura do forno justifica o uso de um plano de experiências do tipo *split-plot* que minimiza as mudanças neste fator. A dificuldade desta mudança não é muito grande. No entanto, justifica-se o uso deste tipo de *design* porque existem importantes variáveis ruído que podem afetar significativamente as experiências se estas não forem realizadas num curto período de tempo.

Para obter uma estimativa do erro da experiência, realizar-se-ão duas réplicas da experiência. A segunda réplica foi realizada imediatamente após o final da primeira.

O conjunto de experiências realizado, já em sequência aleatória, apresenta-se na Tabela A.4. O sinal + representa a configuração alta e o sinal – a configuração baixa do fator. Partindo do exemplo da temperatura do forno, + significa 650 °C e – significa 350 °C.

Tabela A.4: Conjunto de experiências realizadas.

Experiência	Fatores		
	A	B	C
1	-	-	-
2	-	+	+
3	-	+	-
4	-	-	+
5	+	+	+
6	+	+	-
7	+	-	-
8	+	-	+
9	-	+	-
10	-	-	-
11	-	+	+
12	-	-	+
13	+	-	+
14	+	+	-
15	+	+	+
16	+	-	-

Adopta-se a seguinte codificação para os fatores:

A temperatura do forno;

B tempo no forno;

C espaçamento dos fundos.

Uma vez que o custo da sucata é baixo e a medição é fácil de se efetuar, foram recolhidas 5 amostras em cada experiência. Isto permite atenuar ainda mais o efeito da quantidade de borracha aplicada.

B Desenho do regulador de pressão

Aqui apresenta-se a vista explodida do regulador de pressão usado nas linhas, retirada do manual do regulador, disponibilizado pelo fabricante Graco.

Parts

Model 214895, Series H
Without gauge. Includes items 1–26, 40

Model 214706, Series H
With gauge. Includes items 1–40

Model 214706 only

Ref. No.	Part No.	Description	Qty.	Ref. No.	Part No.	Description	Qty.
1	100644	SCREW, soc hd cap; 0.25"–20 x 0.75"	1	19	176136	SCREW, adjustment	1
3	111736*†	SPRING, compression	1	20	112365*†	BALL; tungsten carbide	1
4	104319*†	O-RING, PTFE	1	21	171867*†	GASKET	1
5	105291	SPRING, compression	1	22	171868*†	DIAPHRAGM; PTFE with nylon fabric/Buna-N base	1
6	187880	HOUSING; stainless steel	1	23	235209	UNION, swivel; 3/8 npsm	1
7	176135	CAP, regulator	1	24	215393	KEY, regulator	1
9	187851*†	STEM, valve	1	26	172132*†	GASKET; cellulose fibre	1
10	188004	SCREW, retaining	1	27	187874	GAUGE, pressure; stainless steel; 100 psi (0.7 MPa, 7 bar)	1
11	171855	NUT, adjustment	1	28	187877	TUBE, riser	1
12	176691	SCREW, adjustment	1			(214706 only)	
13	171858	NUT, jam; special	1	40	111858*†	SPRING, compression	1
14	176692	WASHER, flat	1				
15	171860*†	GASKET, seat	1				
16	112366*	SEAT, valve; tungsten carbide	1				
	15F236†	SEAT, valve; tungsten carbide	1				
17	171862	WASHER, diaphragm	1				
18	187879	HOUSING, stem	1				

* Included in Repair Kit 222651.
† Included in Repair Kit 249147 (for solvent or thin material).